

Министерство образования Российской Федерации
ГОУ ВПО «Братский государственный университет»

Д.Б. Ким
А.А. Кропотов
Л.А. Геращенко

ФИЗИКА.

Электричество и электромагнетизм

Лабораторный практикум

Братск 2010

Физика. Электричество и электромагнетизм: Лабораторный практикум / Д.Б. Ким, А.А. Кропотов, Л.А. Геращенко. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010.- 144 с.

Лабораторный практикум включает 17 лабораторных работ и базируется на приборах и оборудовании отечественного производства, часть из которых разработана и изготовлена сотрудниками кафедры при участии студентов.

Каждая работа содержит краткое изложение теории изучаемых явлений, описание экспериментальных установок, методику проведения экспериментов и обработки их результатов.

Предназначен для студентов специальности «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования», будет полезен студентам и другим инженерно-техническим специальностям.

Рецензенты: чл.-кор. РАЕН, д-р хим. наук, профессор **В.К. Воронов**
(Иркутский государственный технический ун-т)
зав. кафедрой общей физики, д-р физ.-мат. наук, профессор **А.Д. Афанасьев**
(Иркутский государственный ун-т)

© Д.Б. Ким, А.А. Кропотов, Л.А. Геращенко, 2010

© ГОУ ВПО «Братский государственный ун-т», 2010

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем практикуме даны описания 18 лабораторных работ по разделу «Электричество и магнетизм».

Каждая работа сопровождается кратким изложением теории изучаемого физического явления, с которой должен ознакомиться студент, внимательно прочитав нужный материал пособия и соответствующие главы учебников.

Кроме этого приведена методика проведения лабораторного эксперимента и обработки его результатов.

Каждая работа содержит вопросы, предназначенные для проверки готовности студента к выполнению лабораторной работы и к ее защите, а также рекомендации по представлению опытных данных в виде таблиц и графиков.

Выполнение лабораторного практикума будет полезно студентам для усвоения теоретического материала и проверки законов физики, а также для решения прикладных задач в будущей профессиональной деятельности.

В пособии обобщен многолетний опыт работы учебной физической лаборатории «Электричество и магнетизм» Братского государственного университета. Лабораторный практикум базируется на приборах и оборудовании отечественного производства. Часть установок и оборудования разработаны и изготовлены сотрудниками кафедры при участии студентов. В постановке лабораторных работ и подготовке методических рекомендаций в различное время принимали участие: профессор Ким Д.Ч., доцент Кропотов А.А., доцент Яскин А.С., доцент Погодаев А.Г., доцент Кобзов Ю.А.

Настоящий лабораторный практикум дополнен и переработан с учетом замечаний, сделанных УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования».

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

К работе на лабораторных установках допускаются лица, ознакомившиеся с описанием установки и прошедшие инструктаж по технике безопасности, который проводит преподаватель, ведущий занятия, с соответствующей записью в журнале инструктажа.

Лица, не прошедшие его и не оформленные в журнале, к работе в лаборатории не допускаются.

Работающие с электрическими приборами должны знать правила их технической эксплуатации.

Нахождение студентов в лаборатории разрешается только в часы, отведенные расписанием, или в дополнительное время, выделенное для самостоятельной подготовки.

Все сотрудники лаборатории обязаны выполнять установленные положения и правила техники безопасности и следить за выполнением их студентами.

Перед началом работы необходимо:

а) ознакомиться с устройством и принципом действия необходимых для выполнения лабораторной работы приборов и оборудования и порядком проведения измерений на них;

б) составить протокол;

в) получить от преподавателя допуск к работе.

Во время работы студенты обязаны соблюдать следующие правила:

а) не приступать к измерениям, не будучи уверенными, что установка собрана вполне правильно и отдельные ее узлы надежно закреплены;

б) не брать принадлежности одной работы для выполнения другой;

в) не разбирать и не развинчивать приборы, даже если показалось, что они неисправны: в этом случае следует обратиться к преподавателю или лаборанту.

При выполнении работы с использованием электрических приборов следует помнить:

- розетки лабораторных столов включаются в сеть переменного тока напряжением 220 В, которое подается на каждый стол от отдельного пульта, установленного рядом на стене;
- включать прибор или установку разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта;
- все соединения производить исключительно цельными, с неповрежденной изоляцией проводниками, зажимая их в клеммы; соединения путем скрутки проводников не допускаются;
- в случае обнаружения чрезмерного нагревания отдельных частей схемы, а тем более появления запаха, немедленно выключить ток и заявить об этом преподавателю или лаборанту.

По окончании работы студенты должны:

- а) отключить все приборы от сети, обеспечив видимый разрыв цепей питания столов;
- б) удостовериться в правильности полученных результатов у преподавателя;
- в) привести в порядок свое рабочее место;
- г) сдать лаборанту полученные принадлежности.

Запрещается:

- а) включать рубильники и переключатели приборов без разрешения преподавателя или лаборанта;
- б) оставлять без наблюдения прибор, находящийся под напряжением.

При несчастном случае необходимо немедленно поставить в известность преподавателя или лаборанта и постараться оказать первую помощь пострадавшему.

Лица, нарушившие правила техники безопасности, несут дисциплинарную, административную и уголовную **ответственность** в порядке, установленном Законодательством Российской Федерации.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Целью лабораторного практикума «Электричество и электромагнетизм» является изучение электромагнитных явлений, проверка на опыте их основных закономерностей. При этом студенты сталкиваются с необходимостью практически ознакомиться с наиболее важными приборами, овладеть основными методами электрических измерений и научиться обрабатывать результаты, полученные при измерениях.

Данные методические указания содержат сведения и рекомендации, позволяющие облегчить приобретение студентами этих навыков.

Классификация электроизмерительных приборов

Основные электрические приборы классифицируются по двум признакам: *по принципу действия* и *по роду измеряемой величины*.

По принципу действия, т.е. в зависимости от природы явлений, на которых основана работа электроизмерительных приборов, их можно разделить на следующие системы: магнитоэлектрические приборы, электромагнитные, электродинамические, тепловые, электростатические и другие. По роду измеряемой величины они делятся на амперметры (для измерения тока), ваттметры (для измерения мощности) и т.п. Рассмотрим системы приборов, используемых при выполнении лабораторных работ.

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с током, протекающим по обмотке легкой подвижной катушки. Данные приборы применяются в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока, а в сочетании с выпрямительными устройствами – переменного тока. Приборы обладают высокой точностью и имеют равномерную шкалу, т.к. отклонение стрелки прибора линейно зависит от силы тока в катушке.

В основе принципа действия приборов электромагнитной системы лежит взаимодействие магнитного поля тока, протекающего по обмотке неподвижной катушки, с подвижным железным сердечником. Отклонение стрелки прибора пропорционально квадрату величины протекающего по катушке тока. Поэтому шкала таких приборов неравномерна. Электромагнитные вольтметры и амперметры применяются в качестве щитовых приборов переменного и

постоянного тока. Точность этих приборов сравнительно невысока.

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей токов, протекающих по двум катушкам, из которых одна подвижна, а другая неподвижна. Сила этого взаимодействия (как и в предыдущем случае) пропорциональна квадрату силы тока, поэтому шкала приборов этой системы тоже неравномерна. Приборы применяются в качестве амперметров и вольтметров постоянных и переменных токов. Точность этих приборов очень высокая.

Работа приборов электростатической системы основана на взаимодействии электрически заряженных проводников. Под действием сил электрического поля подвижный проводник перемещается относительно неподвижного. Величина этого перемещения пропорциональна измеряемому напряжению. Приборы служат преимущественно вольтметрами для измерения высоких постоянных напряжений.

Многопредельные измерительные приборы. Снятие показаний с прибора. Цифровые приборы

Существуют измерительные приборы, электрическую схему которых можно переключать для изменения диапазонов (пределов) измерения. Наличие таких многопредельных приборов обусловлено тем, что часто возникает необходимость измерять электрические величины, изменяющиеся в очень широких пределах, причем с достаточной степенью точности. Ниже будет показано, что нужно стремиться к тому, чтобы указательная стрелка прибора при измерении отклонялась от начального положения более чем на $2/3$ шкалы. При этом говорят, что стрелка находится в «зоне измерения». Исходя из этого правила, следует каждый раз выбирать тот или иной предел измерения, переключая указатель пределов в соответствующее положение.

Многопредельные приборы могут быть одновременно мультиметрами (многоцелевыми или универсальными), позволяющими измерять ток и напряжение (ампервольтметры); ток, напряжение и сопротивление (авометры) и т.д. В этом случае приборы, наряду с переключателем пределов измерения, снабжены переключателем рода работы.

Перед подключением прибора к электрической цепи необходимо: 1) поставить переключатель рода работы в нужное положение (измерение тока или измерение напряжения); 2) переключатель пределов измерения поставить на максимальное значение измеряемой величины. После включения источника электрической энергии последовательным переключением пределов измерения от большего к меньшему нужно добиться отклонения стрелки в зону измерения.

Снятие показаний с прибора (нахождение численного значения измеряемой величины) осуществляют (как правило) тогда, когда стрелка находится в зоне измерения. Вначале вычисляют цену деления шкалы ω , которая для приборов с равномерной шкалой определяется следующим образом:

$$\omega = X_0/N, \quad (1)$$

где X_0 – конечное значение предела измерения; N – полное число делений на шкале прибора. Вычисления производят в системе СИ, т. е. значение X_0 берут в амперах либо в вольтах. Затем вычисляют значение измеряемой величины X :

$$X = \omega \cdot n, \quad (2)$$

где ω – цена деления; n – порядковый номер деления, на которое указывает стрелка прибора при измерении.

В настоящее время в лабораторной практике все чаще используются цифровые многопредельные универсальные измерительные приборы, имеющие ряд достоинств по сравнению со стрелочными приборами: быстрое действие, высокая точность, непосредственный вывод на табло численного значения измеряемой величины, что освобождает от необходимости проведения вычислений по формулам (1) и (2). В современных цифровых приборах выбор предела измерения осуществляется автоматически, экспериментатор устанавливает лишь переключатель рода работы прибора. Все это значительно упрощает процесс измерения. Главным достоинством цифровых приборов является возможность их сочетания с вычислительными машинами, т.е. с системами автоматического управления.

Обозначение по шкале прибора

Все характеристики и данные, необходимые для эксплуатации прибора, обозначены на его корпусе (шкале) условными знаками. Ниже рассмотрены некоторые из них.

1. Род измеряемой величины: амперметр (A), миллиамперметр (mA, mA), микроамперметр (μ A, μ kA), вольтметр (B, V), милливольтметр (mV, mB), киловольтметр (kV), ампервольтметр (A, B) и другие.

2. Род тока I для постоянного тока (—), для переменного тока (~), для постоянного и переменного токов (\simeq).

3. Рабочее положение шкалы прибора: горизонтальное (\leftarrow , \rightarrow) вертикальное (\perp , \uparrow), наклонное (\nearrow , \searrow).

4. Напряжение, которое выдерживает изоляция корпуса прибора (\surd 2 kV либо \surd 2 kV), в киловольтах.

5. Система прибора: магнитоэлектрическая (\square), электромагнитная (\boxtimes), электродинамическая (\boxplus), электростатическая (\boxdot) и др.

6. Класс точности прибора: $\textcircled{0.5}$. Эта характеристика подробнее рассматривается в следующем разделе.

Наиболее важные характеристики используемых приборов необходимо привести в отчете о проделанной лабораторной работе. В первую очередь это касается данных, перечисленных выше.

Погрешности электроизмерительных приборов

Для характеристики точности измерительных приборов используют относительную погрешность измерения E, которая в простейшем случае определяется по формуле

$$E = \frac{\Delta X}{X_0} 100\%, \quad (3)$$

где ΔX – абсолютная погрешность прибора; X_0 – конечное значение данного предела измерения.

Величина относительной погрешности, выраженная в процентах, численно равна классу точности прибора k:

$$E_0 = k. \quad (4)$$

Существуют приборы восьми классов точности в соответствии с величиной погрешности (за счет градуировки, влияния внешних полей и других причин), допускаемой при их использовании: 0,05;

0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности приводится на шкале прибора.

Зная класс точности, по формулам (3) и (4) можно определить абсолютную погрешность ΔX для данного предела измерений:

$$\Delta X = \frac{kX_0}{100}, \quad (5)$$

а затем и относительную погрешность измерения E по формуле

$$E = \frac{\Delta X}{X} 100\%, \quad (6)$$

где X – показание прибора (значение измеряемой величины).

Из анализа приведенных формул следует, что класс точности показывает величину наименьшей относительной погрешности (в процентах), которая может иметь место при измерениях посредством данного прибора. Или еще говорят, что класс точности представляет собой относительную погрешность измерения предельного значения, выраженную в процентах.

Для приборов с равномерной шкалой абсолютная погрешность при любом отклонении стрелки одинакова. Поэтому из (6) следует, что при меньших отклонениях стрелки относительная погрешность больше. Например, пусть у вольтметра класса точности $k=0,5$ шкала содержит $N=150$ делений, используется предел измерения $X_0=7,5$ вольт, а стрелка отклонилась на $n_1=30$ делений. Тогда по формуле (1) цена деления $\omega_1=0,05$ В/дел., по (2) показание прибора $X_1=1,5$ В, по (5) абсолютная погрешность $\Delta X_1=0,0375$ В, по формуле (6) относительная погрешность $E_1= 2,5\%$.

Пусть теперь стрелка этого же прибора отклонилась на $n_2 = 100$ делений, а остальные параметры остались без изменений. Тогда $\omega_2 = \omega_1 = 0,05$ В/дел., $X_2 = 5$ В, $\Delta X_2 = \Delta X_1 = 0,0375$ В, а относительная погрешность $E_2 = 0,75\%$. То есть второе измерение с помощью данного прибора проделано с гораздо большей точностью. Именно поэтому при измерениях следует ставить указатель измерений в многопредельных приборах в такое положение, при котором стрелка оказывалась бы как можно ближе к концу шкалы прибора (как минимум – в последней ее трети; т.е. в зоне измерения).

Оценка погрешности электрических измерений. Определение наиболее выгодных условий эксперимента

Вопрос о математической обработке результатов измерения физических величин подробно рассматривается на вводном занятии к лабораторному практикуму «Механика и молекулярная физика». Здесь приводятся лишь некоторые особенности оценки погрешности при измерении с помощью электрических приборов, а также уточняется ряд основных понятий.

Вначале рассмотрим прямые электрические измерения. Если по условиям эксперимента некоторая физическая величина измеряется несколько раз, то абсолютная погрешность такого измерения Δ складывается из трех составляющих:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_0^2 + \Delta_c^2}, \quad (7)$$

где Δ_n – погрешность, которую дает электроизмерительный прибор; Δ_c – погрешность при снятии отсчета со шкалы прибора; Δ_0 – случайная погрешность.

Первое слагаемое определяется классом точности прибора, и его величина зависит от величины ΔX , которая вычисляется по (5). Физическая сущность этого параметра пояснена в разделе 4. Учитывая, что при выполнении лабораторных работ требуется, чтобы доверительная вероятность $P = 0,95$, для вычисления Δ_n необходимо пользоваться следующим соотношением:

$$\Delta_n = \frac{2}{3} \Delta X, \quad (8)$$

где ΔX рассчитывается по (5).

Вторая составляющая связана с неизбежным округлением показаний электроизмерительных приборов при снятии отсчета со шкалы. Эта погрешность может быть оценена при $P=0,95$ по формуле

$$\Delta_0 = \frac{\omega}{2}, \quad (9)$$

где ω – цена деления равномерной шкалы прибора, вычисляемая по (1).

При выполнении работ в лаборатории электричества и магнетизма часто приходится ограничиваться однократными измерениями физических величин. В первую очередь это касается измерения

параметров электрической цепи (силы тока, напряжения и др.) Вместо (7) для определения абсолютной погрешности однократного измерения (Δ_1) используют более простую формулу, в которую входят только два первых слагаемых (Δ_n и Δ_o):

$$\Delta_1 = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \Delta X\right)^2 + \left(\frac{\omega}{2}\right)^2}. \quad (10)$$

Третье слагаемое в (7) учитывается только в том случае, если физическая величина была измерена несколько раз. Расчет его производится по методу Стьюдента:

$$\Delta_c = t_{pn} S, \quad (11)$$

где t_{pn} – коэффициент Стьюдента; S – средняя квадратичная погрешность серии измерений. В любом случае, если одно из слагаемых (7) значительно (на порядок) больше двух других, эти последние не учитываются.

При косвенных измерениях (с которыми мы, как правило, и будем иметь дело) оценку абсолютной погрешности следует производить, используя схему вычислений, подробно рассмотренную на вводном занятии к лабораторному практикуму «Механика и молекулярная физика». Здесь на конкретном примере напомним лишь алгоритм этой схемы.

Найдем относительную и абсолютную погрешности при определении горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли (лабораторная работа № 40). Рабочая формула для определения горизонтальной составляющей H выглядит следующим образом:

$$H = \frac{In}{2r \operatorname{tg} \alpha}, \quad (12)$$

где I – сила тока в цепи; n – число витков тангенс-гальванометра; r – радиус витков; α – угол отклонения магнитной стрелки.

Согласно упомянутой схеме вычисления, необходимо вначале прологарифмировать рабочую формулу (12):

$$\ln H = \ln I + \ln n - \ln 2 - \ln r - \ln \operatorname{tg} \alpha. \quad (13)$$

Затем выражение (13) продифференцировать, учитывая, что « n » и « 2 » – величины постоянные:

$$\frac{dH}{H} = \frac{dI}{I} + 0 - 0 - \frac{dr}{r} - \frac{dtg\alpha}{tg\alpha}. \quad (14)$$

Последнее слагаемое в (14) продифференцируем отдельно:

$$\frac{dtg\alpha}{tg\alpha} = \frac{d\alpha}{\cos^2\alpha} \cdot \frac{1}{tg\alpha} = \frac{d\alpha}{\sin\alpha \cos\alpha} = \frac{2d\alpha}{\sin 2\alpha}.$$

Далее в (14) заменяем знаки «минус» на «плюс», а дифференциалы dH , dI , dr и $d\alpha$ – на значения абсолютных погрешностей ΔH , ΔI , Δr , $\Delta\alpha$:

$$E = \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}. \quad (15)$$

Поскольку отношение $\Delta H/H$ является относительной погрешностью E измерения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли, то формула (15) используется для вычисления E . Определив $E = \Delta H/H$, находят ΔH – абсолютную погрешность этого измерения: $\Delta H = HE$, причем H рассчитывают по (12).

Окончательный результат измерения дают в виде $H \pm \Delta H$. Таков алгоритм расчета.

Для того чтобы рассчитать E по (15), необходимо вычислить погрешности прямых измерений ΔH , ΔI , Δr , $\Delta\alpha_x$ (величина I непосредственно измеряется амперметром, r – линейкой, α – по круговой шкале компаса тангенс-гальванометра). Эти вычисления производяют следующим образом.

Погрешность прямого измерения ΔI в общем случае рассчитывается по формулам (7)-(11). Однако в данной лабораторной работе производится однократное измерение силы тока, поэтому воспользуемся упрощенной формулой (10), подставив вместо ΔX его выражение из (5):

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{kX_0}{100}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{2}\right)^2}. \quad (16)$$

Все используемые ниже числовые данные взяты произвольно и не являются реальными параметрами лабораторной работы № 40.

Пусть величина тока определяется амперметром, класс точности которого $k = 0,5$, предел измерения $X_0 = I$ А, полное число делений на шкале $N = 200$, т. е. цена деления согласно (1)

$\omega = 0,005\text{А}$. Подставив числовые данные в (16), получим $\Delta I = 0,003\text{ А}$.

Погрешность Δ_r – это погрешность однократного измерения, поэтому в (7) $\Delta_c = 0$; кроме того, измерение r производится не электроизмерительным прибором, поэтому $\Delta_n = 0$. Следовательно, Δ_r определяется только величиной Δ_o , т.е. из (7) получаем соотношение (9), которым и воспользуемся для оценки Δ_r :

$$\Delta_r = \frac{\omega}{2}, \quad (17)$$

где ω – цена деления шкалы прибора, которым измеряем r .

Пусть измерения производились линейкой, деления которой нанесены через 1 см ($\omega = 0,01\text{ м}$). Подставив в (17), получим $\Delta_r = 0,005\text{ м}$.

Погрешность $\Delta\alpha$ тоже рассчитывается по (17). Пусть деления на шкале компаса тангенс-гальванометра нанесены через 2^0 , т. е. через 0,035 радиан ($\omega = 0,035\text{ рад}$). Подставив в (17), получим $\Delta\alpha = 0,0175\text{ рад}$.

Если, например, амперметр показывает силу тока в цепи $I = 0,95\text{ А}$, радиус витков $r = 0,25\text{ м}$, а угол отклонения стрелки $\alpha = 45^\circ$, то с учетом полученных выше величин $\Delta I, \Delta r, \Delta\alpha$ по (15) вычислим значение относительной погрешности: $E = 0,058$ или 5,8%.

Горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли, вычисленная по этим данным из формулы (12), имеет величину $H = 13,3\text{ А/м}$ (если принять число витков $n = 7$).

Поэтому абсолютная погрешность $\Delta H = EH = 0,77 = 0,8\text{ А/м}$, и окончательный результат измерения $(13,3 \pm 0,8)\text{ А/м}$, с доверительной вероятностью 0,95.

На этом примере можно показать, что формула типа (15), полученная для расчета погрешности, может использоваться для определения наиболее выгодных условий эксперимента. В данной формуле величина относительной погрешности измерения силы тока (первое слагаемое) будет зависеть от класса точности и правильности выбора предела измерения амперметра. Второе слагаемое тем меньше, чем точнее прибор, которым измеряют радиус кругового контура с током. Что же касается третьего слагаемого, то оно имеет наименьшую величину при максимальном значении знаменателя ($\sin 2\alpha = 1$), т.е. при $\alpha = 45^\circ$.

Следовательно, наиболее выгодными условиями эксперимента будут следующие: 1) угол отклонения магнитной стрелки при включении электрического тока близок к 45° ; 2) предел измерения амперметра выбран так, что при отклонении магнитной стрелки на угол $\sim 45^\circ$ стрелка амперметра находится в пределах последней трети его шкалы.

Заметим, что в общем случае при косвенных измерениях условия минимума относительной погрешности не всегда находятся легко. Но во многих случаях это оказывается возможным, и анализ полученной формулы [типа (15)] дает полезную информацию об условиях проведения эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Почему шкала у одних приборов равномерная, а у других неравномерная?

2. Как выбирать нужный предел измерения у многопредельного прибора?

3. Что такое цена деления? Как находят численное значение измеряемой величины по отклонению стрелки многопредельного прибора?

4. По обозначениям на шкале данного прибора расскажите об условиях его эксплуатации, назначении, принципе действия, оцените его точность.

5. Что такое класс точности прибора? При каких условиях относительная погрешность при измерении данным прибором минимальна?

6. Как оценивается абсолютная погрешность прямых электрических измерений? Из каких составляющих она складывается?

7. Каков алгоритм расчета относительной и абсолютной погрешностей при косвенных измерениях (на предложенном примере)? Для чего их определяют? Как записывается окончательный результат измерения?

8. Определите наиболее выгодные условия проведения эксперимента в данной лабораторной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 31

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ R–МОСТА УИТСТОНА

Цель работы: 1. Изучение принципа работы измерительной мостовой схемы. 2. Определение величины сопротивления двух проводников и величины сопротивления при их последовательном и параллельном соединении. 3. Определение величины внутреннего сопротивления гальванометра.

Приборы и принадлежности: реохорд, набор резисторов с неизвестными сопротивлениями, магазин сопротивлений, милливольтметр, источник постоянного тока.

Теория R–моста Уитстона

Электрическим мостом в технике измерений называют электрический прибор для измерения сопротивлений, емкостей, индуктивностей и других электрических величин, представляющих собой измерительную мостовую цепь, действие которой основано на методике сравнения измеряемой величины с образцовой мерой. Как известно, метод сравнения дает весьма точные результаты измерений, вследствие чего мостовые схемы получили широкое распространение как в лабораторной, так и в производственной практике.

Классическая мостовая цепь состоит из четырех сопротивлений Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 , соединенных последовательно в виде четырехугольника (рис. 1), причем точки А, Е, В, D называют вершинами. Ветвь АВ, содержащая источник питания U_n , называется диагональю питания, а ветвь ED, содержащая сопротивление нагрузки Z_H , – диагональю нагрузки. Сопротивления Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 , включенные между двумя соседними вершинами, называются плечами мостовой цепи.

Название «мостовая цепь» объясняется тем, что диагонали, как мостики, соединяют две противоположные вершины (диагональ нагрузки, например, ранее так и называлась – мост). Схема, представленная на рис. 1, известна в литературе как четырехплечный мост, или мост Уитстона. В данной лабораторной работе мы познакомимся с работой одной из разновидностей моста Уитстона, а

именно с той, которая позволяет проводить измерения величин активных сопротивлений.

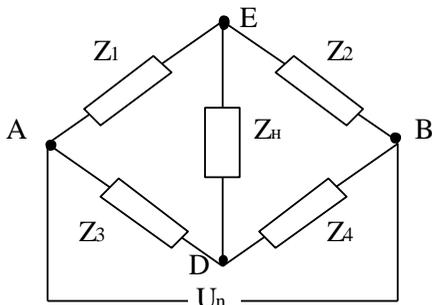


Рис. 1

Условие равновесия моста Уитстона. R-мост Уитстона предназначен для измерения величин сопротивлений. Он состоит из реохорда АВ, чувствительного гальванометра и двух резисторов – известной величины R и неизвестной – R_x . (рис. 2).

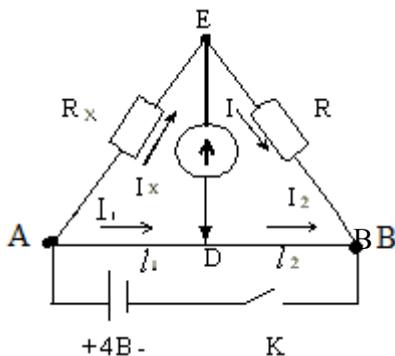


Рис. 2

Реохорд представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт D. Рассмотрим схему без участка ED. Замкнем ключ K. Тогда по проволоке АВ потечет ток и вдоль нее будет наблюдаться равномерное падение потенциала от величины φ_a (в точке А) до величины φ_b (в точке В). В цепи АЕВ пойдет ток и будет наблюдаться падение потенциала от φ_a до φ_e (на резисторе R_x) и от φ_e до φ_b (на резисторе R). Очевидно, в точке Е потенциал имеет проме-

жуточное значение φ_e между значениями φ_a и φ_b . Поэтому на участке АВ всегда можно найти точку D, потенциал которой равен потенциалу в точке E: $\varphi_D = \varphi_e$. Если между точками E и D включен гальванометр, то в этом случае ток через него не пойдет, т.к. $\varphi_e - \varphi_D = 0$.

Такое состояние моста называется равновесием моста. Покажем, что условие равновесия определяется соотношением

$$\frac{R_x}{R} = \frac{r_{AD}}{r_{DB}}. \quad (1)$$

Действительно, на основании второго закона Кирхгофа для любого замкнутого контура алгебраическая сумма падений потенциала равна алгебраической сумме электродвижущих сил ε :

$$\sum_{i=1}^n I_i r_i = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k. \quad (2)$$

Запишем эти условия для контуров AED и EBD в случае уравновешенного моста (рис. 2):

$$I_x R_x - I_1 r_{AD} = 0; \quad (3)$$

$$IR - I_2 r_{DB} = 0. \quad (4)$$

Используем первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма сил токов в узле равна нулю: $\sum_{i=1}^n I_i = 0$. Узлом называется точка

или место соединения трех и более проводников (рис. 2). Для узла E: $I_x - I + I_G = 0$. При равновесии моста $I_G = 0$, тогда получим $I_x = I$, $I_1 = I_2$. Из (3) и (4) получим

$$IR_x = I_1 \cdot r_{AD}, \quad IR = I_2 \cdot r_{DB}.$$

Деля первое на второе, найдем соотношение (1). Так как сопротивление изотропного проводника цилиндрической формы зависит от геометрических размеров и материала, т.е. $r = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление проводника; l , S – длина и площадь сечения проводника, то сопротивление участков реохорда АВ можно записать в виде

$$r_{AD} = \rho \frac{l_1}{S}; \quad r_{DB} = \rho \frac{l_2}{S}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (1), получим искомую рабочую формулу

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}, \quad (6)$$

где l_1 и l_2 – длины плеч реохорда АВ; R – сопротивление, подбираемое магазином сопротивлений.

Мост Уитстона может быть также использован для определения внутреннего сопротивления гальванометра r_G , причем гальванометр $\textcircled{\uparrow}$ в этом случае включается, как показано на рис. 3.

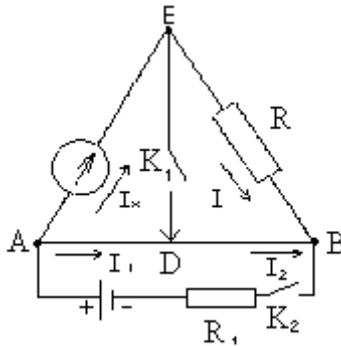


Рис. 3

Если потенциалы φ_E и φ_D равны, то сила тока в диагонали ED равна нулю, а поэтому замыкание и размыкание ключа K_1 не будут вызывать изменения силы тока в ветвях мостовой схемы, в том числе и в ветви гальванометра.

При равенстве потенциалов φ_E и φ_D для моста имеет силу формула

$$r_G = R \frac{l_1}{l_2}, \quad (7)$$

по которой непосредственно определяется измеряемое сопротивление гальванометра. Таким образом, мостовая схема может быть использована для измерения сопротивлений не только в том случае, когда гальванометр включен в ее диагональ, но и тогда, когда он включен в одно из ее плеч. В этом случае надо при измерении

добиваться постоянства показания гальванометра при замыкании и размыкании ключа в указанной диагонали схемы.

Такой прием применяется для измерения сопротивления гальванометра, т.к. он не требует включения второго прибора в диагональ схемы.

Ход работы

Упражнение 1. Измерение величины сопротивления двух проводников, а также общего сопротивления при их последовательном и параллельном соединениях.

1. Собрать схему, изображенную на рис. 2.

2. Измерить величину сопротивления R_{x1} , а также последующих сопротивлений (три раза). Для этого установить движок реохорда на середину ($l_1 = l_2$) и подбором величины сопротивления магазина R уравновесить мост, то есть добиться нулевого положения стрелки при включенном питании.

Повторить измерения при $l_1 < l_2$ и $l_1 > l_2$, устанавливая движок реохорда вблизи его середины (тем самым достигается минимальная погрешность результата). Измеряемая величина сопротивления определяется по формуле

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}.$$

3. Включить в цепь R_{x2} вместо R_{x1} и измерить его величину согласно п. 2.

4. Измерить величины сопротивлений последовательного и параллельного соединений R_{x1} и R_{x2} , включаемых вместо R_x в плечо АЕ (рис. 2). Измерения проводить согласно требованиям пункта 2.

5. По формулам

$$R_{x-послед} = R_{x1} + R_{x2} \text{ и } R_{x-пар} = \frac{R_{x1} \cdot R_{x2}}{R_{x1} + R_{x2}}$$

рассчитать значения величин сопротивлений и сравнить их со значениями, полученными при выполнении пункта 4.

6. Результат измерений занести в таблицу 1.

7. Оценить погрешность измерения величин сопротивлений R_{x1} , R_{x2} , $R_{x \text{ посл.}}$ и $R_{x \text{ пар.}}$

Таблица 1

Измеряемое сопротивление	№ п/п	l_1 , мм	l_2 , мм	R, Ом	R_x , Ом	$R_{x \text{ ср.}}$, Ом	Расчетные значения $R_{x \text{ посл.}}$, $R_{x \text{ пар.}}$, Ом
R_{x1}	1						—
	2						
	3						
R_{x2}	1						—
	2						
	3						
$R_{x \text{ посл.}}$	1						
	2						
	3						
$R_{x \text{ пар.}}$	1						
	2						
	3						

Упражнение 2. Определение величины внутреннего сопротивления гальванометра.

1. Собрать схему, изображенную на рис. 3.

2. Измерить три раза величину r_G . Мост уравнивается как изменением величины сопротивления магазина R, так и изменением положения движка D реохорда АВ (рис. 3). Для достижения более высокой точности измерений нужно стремиться к тому, чтобы отношение l_1/l_2 (рис. 3) не сильно отличалось от единицы.

ВНИМАНИЕ! При включении гальванометра в плечо моста (рис. 3) последний находится в равновесии, если при замыкании и размыкании ключа K_1 гальванометр не меняет своих показаний.

3. По формуле

$$r_G = R \frac{l_1}{l_2}$$

рассчитать сопротивление гальванометра. Данные измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

R, Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	r_G , Ом	r_{cp} , Ом

Вопросы для допуска к работе

1. Назовите цель работы.
2. Каков принцип действия моста Уитстона?
3. Изменится ли условие равновесия моста, если гальванометр и источник тока поменять местами?
4. Почему гальванометр, применяемый в мосте Уитстона, имеет двухстороннюю шкалу с нулем посередине?
5. Оцените погрешность метода. При каком условии погрешность метода будет минимальной?

Вопросы для защиты работы

1. Сформулируйте законы Кирхгофа, поясните их применение.
2. Используя законы Кирхгофа, выведите условия равновесия моста Уитстона.
3. Нарисуйте электрическую цепь последовательного и параллельного соединения проводников и рассчитайте их сопротивления.
4. От каких величин зависит сопротивление изотропного проводника?
5. Каково практическое использование моста Уитстона?
6. Дайте определение электрического потенциала, ЭДС, напряжения.
7. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 32

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы - определение температурного коэффициента сопротивления меди.

Приборы и принадлежности: исследуемый медный проводник, измерительный мост или омметр, термометр.

Элементарная теория проводимости металлов

Величина электрического сопротивления R конкретного металлического проводника зависит как от геометрической формы (т.е. размеров), так и от физических свойств материалов. Для однородного изотропного проводника правильной геометрической формы длиной l и площадью сечения S величина сопротивления R равна

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

где ρ - удельное сопротивление материала, Ом·м.

Обратная величина ρ , т.е. $\sigma = \frac{1}{\rho}$, называется удельной проводимостью. Единица измерения σ - $\left[\frac{C_m}{m} \right]$ (См - сименс).

Величины ρ и σ зависят от химических примесей, дефектов кристаллической решетки, магнитного состояния вещества, температуры, давления и других факторов.

При постоянном давлении для неферромагнитных сверхпроводящих и изотропных проводников вблизи комнатной температуры и выше (до температуры плавления) удельное сопротивление ρ пропорционально T . При низких температурах вблизи абсолютного нуля наблюдается нелинейная зависимость ($\sim T^5$) удельного сопротивления ρ (кривая 1 на рис. 1). Величина остаточного сопротивления $\rho_{ост}$ при $T = 0$ К зависит от примесей химических элементов, дефектов кристаллической решетки. У абсолютно чистого проводника с идеальной кристаллической решеткой при $T = 0$ К удельное сопротивление ρ равно нулю (кривая 2 на рис. 1).

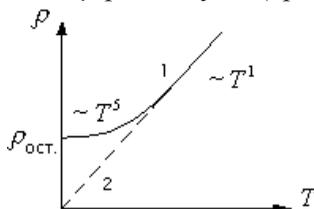


Рис. 1

Далее рассматриваем неферромагнитные и изотропные металлические проводники.

Температурную зависимость удельного сопротивления ρ изотропных проводников объясняет квантовая теория металлов. Электроны проводимости (валентные) движутся беспорядочно и в отсутствие внешнего электрического поля они находятся в поле кристаллической решетки в равновесном состоянии. Как в классической, так в квантовой теории электрическое сопротивление объясняется взаимодействием электронов - проводимости с дефектами (примеси, искажение решетки, вакансии и т. д.) кристаллической решетки, т.е. рассеянием электронов на дефектах. В отсутствие внешнего электрического поля ($E=0$) из-за беспорядочного движения, электроны испытывают столкновение (рассеяние) с колеблющимися в узлах решетки, ионами, примесями и другими. В результате чего изменяются их направление и величина скорости движения. Поэтому, в среднем число электронов, движущихся в одном направлении равно числу электронов, движущихся в противоположном направлении. Соответственно, отсутствует преимущественное направление движения электронов, скорость упорядоченного движения равна нулю, ток – отсутствует. В грубом приближении, траекторию движения электронов проводимости при $E=0$, можно представить в следующем виде:

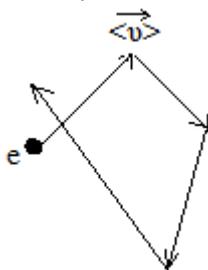


Рис. 2

где $\langle v \rangle$ - средняя скорость теплового движения электрона.

Это мгновенная фотография беспорядочного движения электрона. Стрелками обозначены положения вектора скорости теплового движения. Под действием внешнего электрического поля \vec{E} электроны-проводимости будут совершать упорядоченное движение (см. рис. 3), т.к. на них будет действовать электрическая сила $\mathbf{F}_e = e\mathbf{E}$. Электроны будут приобретать дополнительную кинетическую энергию, которую отдают дефектам. Сразу после столкновения приобретенная электроном кинетическая энергия равна нулю,

соответственно начальная скорость упорядоченного движения, также равна нулю. Затем, под действием поля \vec{E} , электроны опять будут приобретать дополнительную кинетическую энергию, которую также отдает дефектам и т. д.. Следовательно, при взаимодействии электронов с дефектами происходит передача энергии и импульса.

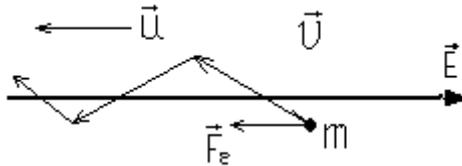


Рис. 3

Рассмотрим классическую теорию.

Под действием внешнего электрического поля \vec{E} электроны будут совершать упорядоченное движение (см. рис. 3), т.к. на них действует электрическая сила $F_e = eE$, кроме того, на электрон со стороны поля кристаллической решетки действует сила сопротивления $F_c = -\frac{m u}{\tau}$. Поэтому общая сила, действующая на электрон, равна

$$F = eE - \frac{m u}{\tau}. \tag{2}$$

По второму закону Ньютона

$$m a = eE - \frac{m u}{\tau}. \tag{3}$$

Дрейфовая скорость u будет увеличиваться до тех пор, пока $F_e = F_c$, $a = 0$, т.е. $eE = \frac{m u}{\tau}$, отсюда

$$u = \frac{e \tau}{m} E. \tag{4}$$

Величина, равная $b = \frac{e \tau}{m}$, называется подвижностью электрона.

Смысл коэффициента τ следующий. Пусть $E = 0$, тогда (3) запишется в виде $ma = -\frac{mu}{\tau}$. Так как ускорение электрона определяется по формуле: $a = \frac{du}{dt}$, то

$$\frac{du}{dt} = -\frac{u}{\tau}, \quad \text{или} \quad \int_{u_0}^u \frac{du}{u} = -\int_0^t \frac{dt}{\tau}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что $u = u_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$. Если $\frac{u_0}{u} = e$, то $t = \tau$ и τ — это время, за которое электрон уменьшает дрейфовую скорость в e раз. За это время он пробегает расстояние, которое называется *транспортным*:

$$L = \gamma \langle \lambda \rangle, \quad (6)$$

где γ — число столкновений (рассеяния) электронов с дефектами; $\langle \lambda \rangle$ — средняя длина свободного пробега электрона между двумя последовательными столкновениями. За время τ электрон испытывает γ число столкновений с дефектами кристаллической решетки и пробегает транспортное расстояние L .

С другой стороны, транспортное расстояние равно $L = \langle v \rangle \tau$, так как электрон движется со средней скоростью.

С учетом (6) получим

$$\langle v \rangle \tau = \gamma \langle \lambda \rangle \quad \text{или} \quad \tau = \frac{\gamma \langle \lambda \rangle}{\langle v \rangle}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (4), найдем

$$u = \frac{e \langle \lambda \rangle}{m \langle v \rangle} \gamma E. \quad (8)$$

Плотность тока равна

$$j = ne u, \quad (9)$$

где n — концентрация электронов.

Подставляя (8) в (9), получим

$$j = \frac{ne^2 \langle \lambda \rangle}{m \langle v \rangle} \gamma E. \quad (10)$$

Закон Ома в дифференциальной форме

$$j = \sigma E. \quad (11)$$

Тогда с учетом (10) и (11) имеем

$$\sigma = \frac{ne^2}{m \langle v \rangle} \gamma \langle \lambda \rangle \quad \text{и} \quad \rho = \frac{m \langle v \rangle}{ne^2 \gamma \langle \lambda \rangle}. \quad (12)$$

Полученная, с точки зрения квантовой теории, формула удельного сопротивления ρ имеет такой же вид, что и формулы (12). Но вместо m , $\langle v \rangle$, $\langle \lambda \rangle$, рассмотренные в классической теории, в квантовой теории вводятся : эффективная масса m^* , фермиевская скорость v_F и длина свободного пробега λ_F . Учитывая эти изменения, формула (12) приобретет следующий вид (13):

$$\rho = \frac{m^* v_F}{ne^2 \gamma \lambda_F}. \quad (13)$$

Квантово-механические расчеты показывают, что при *низких* температурах число столкновений $\gamma \sim T^{-2}$, а $\lambda_F \sim T^{-3}$. Тогда удельное сопротивление ρ пропорционально T^5 и сопротивление металлов обусловлено рассеянием электронов проводимости на дефектах и ионах кристаллической решетки.

При *высоких* температурах сопротивление в основном обусловлено рассеянием электронов на тепловых ионах кристаллической решетки (фононах), а сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на дефектах, пренебрежимо мало. Поэтому при высоких температурах γ не зависит от T , а $\lambda_F \sim T^{-1}$. Тогда $\rho \sim T$.

Расчет показывает, что при высоких температурах удельное сопротивление зависит от температуры:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha T), \quad (14)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления; ρ_0 – удельное сопротивление при температуре 0°C ; t – температура по шкале Цельсия.

Температурный коэффициент α равен относительному изменению удельного сопротивления при изменении температуры проводника на 1 градус:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, [K^{-1}].$$

Для металлических изотропных проводников коэффициент α почти не зависит от температуры и примерно равен $\alpha = \frac{1}{273} \approx 0,0034 K^{-1}$. Так как сопротивление металлических проводников зависит от ρ [см. формулу (1)], т.е. $R \sim \rho$, то с учетом (14) сопротивление можно представить в виде

$$R = R_0(1 + \alpha t). \quad (15)$$

Откуда можно найти α :

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 t}, \quad (16)$$

где R_0 – сопротивление проводника при $t = 0^\circ\text{C}$.

Для металлических проводников $\alpha > 0$, т.е. с увеличением температуры сопротивление увеличивается. Поэтому эти проводники называются *проводниками I рода*. Для электролитов, графита и других $\alpha < 0$, т.е. с увеличением температуры сопротивление проводника уменьшается. Они называются *проводниками II рода*.

Ход работы

Схема установки приведена на рис. 4. Исследуемый проводник помещается в колбу, заполненную непроводящей жидкостью (масло, глицерин, дистиллированная вода). Температура измеряется термометром.

Для равномерного нагревания жидкость перемешивается мешалкой. Исследуемый проводник R подключается в качестве неизвестного сопротивления к клеммам измерительного моста. Измеряют сопротивление исследуемого проводника при комнатной температуре.

Включают нагреватель и непрерывно перемешивают жидкость мешалкой.

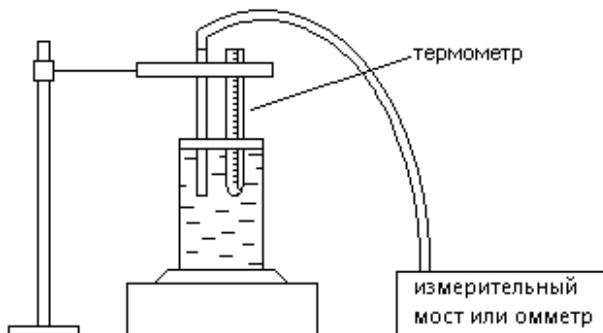


Рис. 4

При нагревании через каждые 5-10 °С измеряют сопротивление проводника. Измерения проводят до температуры 80-90 °С. Полученные результаты заносят в таблицу.

Таблица

t, °С	
R, Ом	

Строят зависимость $R = f(t)$, откладывая по оси абсцисс значения температуры, а по оси ординат значения R. Значения R_0 и α определяют следующим образом: продолжают полученную прямую до пересечения с осью R (рис. 5). Точка пересечения дает значение R_0 . Значение α вычисляют по формуле

$$\alpha = \frac{R_a - R_0}{R_0 t_a}.$$

Точка **а** – точка, выбранная вами на полученной прямой между двумя последними экспериментальными точками.

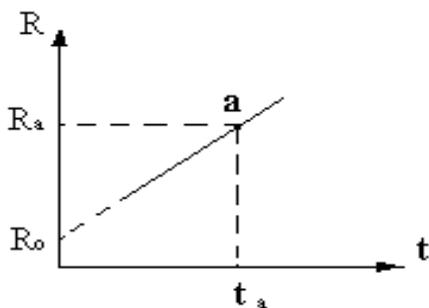


Рис. 5

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Почему сопротивление металлов увеличивается с возрастанием температуры?
3. Что называется температурным коэффициентом сопротивления? Выведите размерность температурного коэффициента сопротивления.

Вопросы для защиты работы

1. Объясните механизм проводимости в металлах.
2. В чем существенные отличия объяснения электрического сопротивления в классической теории металлов от квантовой?
3. Вывести формулу температурной зависимости удельного сопротивления.
4. Какие проводники называются проводниками I и II рода?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 33

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ С-МОСТА УИТСТОНА

Цель работы - изучение работы С-моста Уитстона и определение емкости конденсаторов; определение емкости конденсаторов при их последовательном и параллельном соединениях.

Приборы и принадлежности: набор конденсаторов неизвестной емкости, магазин емкости, реостат, источник питания, осциллограф или нуль-индикатор.

Теория электрического моста

Предварительно необходимо изучить теоретическую часть лабораторной работы № 31.

Принципиальная схема четырехплечевого (одинарного) моста приведена на рис. 1. Плечи моста AB, BC, CD, DA содержат в общем случае комплексные сопротивления, т.е. включают в себя как активные сопротивления, так и емкостные и индуктивные. Питание моста осуществляется от источника переменного тока E , подключенного к диагонали AC; в диагональ BD включен индикатор (N): либо гальванометр, либо осциллограф.

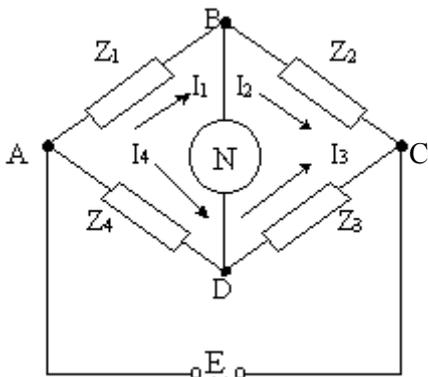


Рис. 1

Мост называется *сбалансированным*, или *уравновешенным*, если ток в измерительной диагонали BD равен нулю, то есть, когда потенциалы точек B и D равны друг другу, совпадают как по фазе,

так и по амплитуде. Это имеет место при равенстве разностей потенциалов $U_1 = U_4$ на сопротивлениях Z_1 и Z_4 .

Определим разности потенциалов в случае сбалансированного моста.

Так как ток в диагонали индикатора равен нулю, то из первого закона Кирхгофа следует, что комплексные силы тока равны соответственно: $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$, $\dot{I}_3 = \dot{I}_4$.

Далее из закона Ома определим силы тока:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{E}{Z_1 + Z_2}; \quad \dot{I}_3 = \dot{I}_4 = \frac{E}{Z_3 + Z_4},$$

где Z_i – комплексное сопротивление; E – электродвижущая сила.

Отсюда легко найти U_1 и U_4 :

$$U_1 = \dot{I}_1 Z_1 = E \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}; \quad U_4 = \dot{I}_4 Z_4 = E \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4}.$$

Так как $U_1 = U_4$, получим

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4. \quad (1)$$

Из (1) следует, что в случае уравновешенного моста между комплексными сопротивлениями имеет место вполне определенное соотношение, а именно: в сбалансированном мосте произведения полных сопротивлений противолежащих плеч равны. Это позволяет вычислить измеряемое сопротивление, если известны сопротивления трех других плечей. Комплексные сопротивления можно представить в виде

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + i x_1; & Z_2 &= R_2 + i x_2; \\ Z_3 &= R_3 + i x_3; & Z_4 &= R_4 + i x_4, \end{aligned} \quad (2)$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 – активные сопротивления; x_1, x_2, x_3, x_4 – реактивные (емкостное или индуктивное сопротивления); i – мнимая единица ($i = \sqrt{-1}$).

Подставив выражения Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 в (1), получим:

$$R_1 R_3 + i (R_1 x_3 + R_3 x_1) - x_1 x_3 = R_2 R_4 + i (R_2 x_4 + R_4 x_2) - x_2 x_4.$$

При выполнении условия

$$\left. \begin{aligned} R_1 R_3 - x_1 x_3 &= R_2 R_4 - x_2 x_4 \\ x_1 R_3 + x_3 R_1 &= x_2 R_4 + x_4 R_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

обеспечивается равенство потенциалов в точках В и D по амплитуде и по фазе.

В данной работе рассматривается С-мост Уитстона, позволяющий проводить измерения величин емкости конденсаторов. Схема С-моста Уитстона, где в качестве индикатора применен осциллограф, приведена на рис. 2.

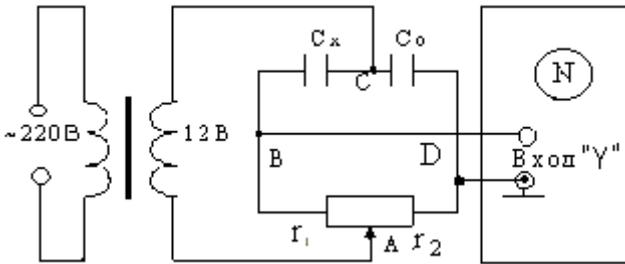


Рис. 2

Сравнивая данную схему с рис. 1, заметим, что точки А, В, С, D на рис. 2 соответствуют аналогичным точкам на рис. 1. Следовательно, выражения (2) можно записать в виде

$$Z_1 = R_1 + ix_1 = r_1,$$

где $R_1 = r_1$, $x_1 = 0$, r_1 – сопротивление левого плеча реостата (по схеме рис. 2), реактивное сопротивление x_1 равно нулю;

$$Z_2 = R_2 + ix_2 = ix_2,$$

где $R_2 = 0$; $x_2 = \frac{1}{2\pi\nu \cdot C_x}$ – величина реактивного сопротивления

неизвестной емкости переменному току частотой ν (в нашем случае ν – частота тока в промышленной сети, равная 50 Гц);

$$Z_3 = R_3 + ix_3 = ix_3,$$

где $R_3 = 0$, $x_3 = \frac{1}{2\pi\nu \cdot C_0}$; C_0 – известная емкость конденсатора,

определяемая магазином емкости;

$$Z_4 = R_4 + ix_4 = r_2,$$

где $R_4 = r_2$, $x_4 = 0$, r_2 – сопротивление правого (по схеме) плеча реостата.

Подставляя полученные величины R_i и x_i в систему (3), получаем

$$-\frac{r_1}{2\pi\nu C_0} = -\frac{r_2}{2\pi\nu C_x}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) легко можно найти C_x :

$$C_x = C_0 \frac{r_2}{r_1}. \quad (5)$$

Поскольку сопротивление любого металлического ферромагнитного и изотропного проводника определяется формулой

$$r = \rho \frac{l}{s}, \text{ то}$$

$$r_1 = \rho \frac{l_1}{s}; \quad r_2 = \rho \frac{l_2}{s}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим

$$C_x = C_0 \frac{l_2}{l_1}, \quad (7)$$

где l , s – длина и сечение проводника; ρ – удельное сопротивление.

Формула (7) и есть основная расчетная формула для определения величины неизвестной емкости.

Емкостью конденсатора называется отношение заряда (q), сосредоточенного на обкладках конденсатора и разности потенциалов (U) между обкладками: $C = \frac{q}{U}$.

$$C = \frac{q}{U}.$$

В данной работе l_1 и l_2 являются длинами плеч реостата.

Осциллограф в качестве нуль-индикатора используют следующим образом. У осциллографа выключают горизонтальную развертку, вследствие чего луч на экране может отклоняться только по вертикали. Это, в свою очередь, означает, что если на вход осциллографа (вход Y) подано напряжение, т.е. мост разбалансирован и разность потенциалов между точками В и D (рис. 2 или рис. 1) не равна нулю, то на экране мы видим вертикальную линию. Если же мост уравновешен, то разность потенциалов между точками В и D, а следовательно, и напряжение на входе осциллографа равны нулю и вертикальная линия на экране обращается в точку.

Ход работы

1. Собрать схему, показанную на рис. 2. В зависимости от предложенных приборов к клеммам В и D моста подключить входные клеммы либо осциллографа, либо лампового нуль-индикатора.

2. В качестве C_x подключить конденсатор неизвестной емкости C_{x1} .

3. Измерить величину неизвестной емкости. Для этого движок потенциометра установить вблизи середины шкалы (с тем чтобы относительная погрешность была минимальной – см. лабораторную работу № 31) и подбором величины емкости магазина и корректировкой положения движка потенциометра уравновесить мост, т.е. добиться на экране осциллографа обращения вертикальной линии в точку.

ВНИМАНИЕ! Категорически запрещается работать с большой яркостью луча, т.к. сведение вертикальной линии в точку вызовет немедленное прогорание люминофора экрана.

Сместив движок реостата на небольшое расстояние (~1-2 см) от середины шкалы потенциометра, то в одну, то в другую сторону, произвести еще два измерения.

Величину неизвестной емкости рассчитать по формуле (7).

4. Вместо C_{x1} подключить C_{x2} и измерить его величину согласно пункту 3.

5. В качестве C_x подключить поочередно соединенные последовательно и параллельно C_{x1} и C_{x2} и провести измерения по пункту 3.

6. По формулам

$$C_{\text{пар.}} = C_{x1} + C_{x2}, \quad C_{\text{посл.}} = \frac{C_{x1} \cdot C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} \quad (8)$$

проверить правильность значений емкостей, полученных при выполнении пункта 5.

Результат измерений занести в таблицу.

Измеряемая емкость, мкФ	№ п/п	C_0 , мкФ	l_1 , см	l_2 , см	C_x , мкФ	$C_{хср.}$, мкФ	Расчетные значения $C_{пар.}$, $C_{посл.}$, мкФ
C_{x1}	1						–
	2						
	3						
C_{x2}	1						–
	2						
	3						
$C_{пар}$	1						
	2						
	3						
$C_{посл}$	1						
	2						
	3						

Примечание. Измерение каждого значения емкости проводить не менее трех раз.

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Объясните принцип действия измерительной мостовой цепи.
3. Почему в данной работе схема питается переменным током?
4. Оцените погрешность измерения электроемкостей.

Вопросы для защиты работы

1. Что называется электроемкостью конденсатора?
2. Выведите условие равновесия С-моста Уитстона.
3. Выведите формулы электроемкостей плоского, сферического и цилиндрического конденсаторов.
4. Нарисуйте электрическую цепь последовательного и параллельного соединения конденсаторов и получите формулы электроемкостей этих соединений.
5. Каковы Ваши критические замечания по данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 34

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: 1. Ознакомление с принципом действия осциллографа. 2. Определение чувствительности отклоняющих пластин электронно-лучевой трубки осциллографа.

Приборы и принадлежности: электронный осциллограф, вольтметр, регулируемый источник напряжения.

Принципиальное устройство электронного осциллографа

Перед выполнением работы необходимо уяснить принцип действия и назначение электронного осциллографа. Например, с помощью осциллографа можно измерять силу тока, напряжение и их изменение во времени, сдвиг фаз между ними, сравнивать частоты и амплитуды различных переменных напряжений. Кроме того, осциллограф при применении соответствующих преобразователей позволяет исследовать неэлектрические процессы, например, измерять малые промежутки времени, кратковременные давления и т.д.

Достоинствами электронно-лучевого осциллографа являются его высокая чувствительность и безынерционность действия, что позволяет исследовать процессы, длительность которых порядка 10^{-8} – 10^{-9} с.

Для ознакомления с работой осциллографа разберем назначение отдельных его частей.

Электронно-лучевая трубка. Важнейшим элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка (рис. 1), которая внешне представляет собой стеклянную колбу специальной формы, откаченную до высокого разрежения, с расположенной внутри системой электродов.

На рис. 1 схематически представлено устройство трубки с электростатическим управлением. В торце узкой части стеклянного баллона 8 расположен катод в виде небольшого цилиндра 2, внутри которого помещена спираль для подогрева 1. Дно цилиндра с внешней стороны покрыто оксидным слоем; с его поверхности при подогреве вылетают электроны. Вблизи катода расположен полый цилиндр 3, называемый управляющим электродом или модулято-

ром, который служит для изменения плотности потока электронов, т.е. позволяет регулировать яркость пятна на экране, 9, покрытом люминофором. Модулятор имеет отрицательный потенциал относительно катода.

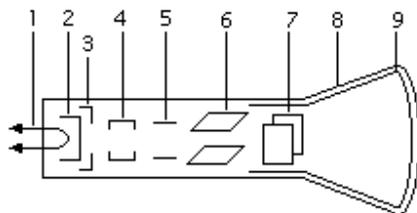


Рис. 1

Далее по оси трубки располагаются еще два цилиндра – первый 4 и второй 5 аноды. Первый анод, находясь под положительным потенциалом в несколько сотен вольт, ускоряет движущийся от катода поток электронов. Ко второму аноду подводится напряжение, достигающее в некоторых электронно-лучевых приборах десятков киловольт, и поток электронов выходит из второго анода с высокой скоростью. Аноды предназначены как для ускорения электронов, так и для формирования электронного луча – узкого, сходящегося у поверхности экрана пучка электронов. Изменением величины напряжения на первом аноде 4 получают необходимую фокусировку луча. Вся система вышеперечисленных электродов крепится на траверсах и образует единое устройство, называемое электронным прожектором.

Выйдя из прожектора, электронный поток (луч) попадает в отклоняющую систему, служащую для управления положением электронного луча в пространстве. В рассматриваемой нами трубке отклоняющая система состоит из двух пар пластин 6 и 7, расположенных попарно в вертикальной (горизонтально отклоняющие пластины 7) и горизонтальной (вертикально отклоняющие пластины 6) плоскостях. Каждая пара пластин образует плоский конденсатор, и если потенциалы пластин различны, то между ними создается электрическое поле. Между пластинами электроны движутся в поперечном электрическом поле по параболической траектории, и по выходе из пластин траектория оказывается направленной по отношению к оси трубки под некоторым углом, величина которого зависит от разности потенциалов на пластинах и от размеров пла-

стин. Следовательно, с помощью этих двух пар пластин, создающих взаимно перпендикулярные электрические поля, можно управлять электронным потоком в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Пусть на горизонтально отклоняющие пластины 7 подано напряжение U_x , а на вертикально отклоняющие пластины - U_y , тогда под действием приложенного напряжения U_x след электронного потока смещается на величину X в горизонтальном направлении, а под действием U_y – на величину Y в вертикальном направлении.

Отклонение Y электронного луча в вертикальном направлении можно рассмотреть на примере отклонения одного электрона (рис. 2).

Пусть на горизонтальные пластины поданы потенциалы, как показано на рис. 2. Тогда однородное электрическое поле внутри пластин направлено снизу вверх (см. рис. 2). Пусть в это электрическое поле влетает электрон с начальной скоростью \vec{V}_0 (\vec{V}_0 – это скорость электрона, полученная в результате действия анодного напряжения U_0). На него со стороны электрического поля действует электрическая сила, равная

$$\vec{F} = e\vec{E}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; E – напряженность электрического поля между пластинами, которая определяется так:

$$E = \frac{U_y}{d}, \quad (2)$$

где U_y – разность потенциалов, приложенных к пластинам; d – расстояние между пластинами.

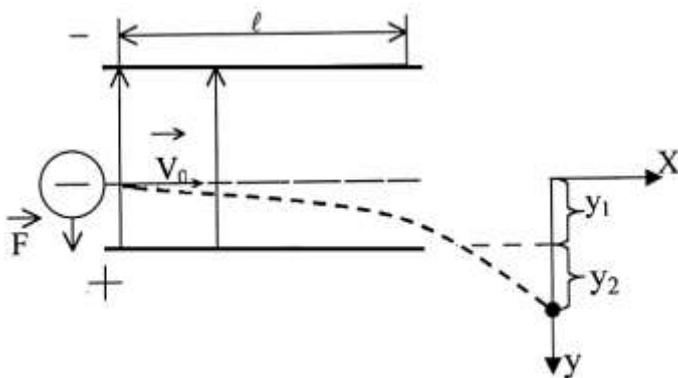


Рис. 2

Тогда с учетом (2) и (1) получим

$$F = e \frac{U_y}{d}. \quad (3)$$

Поскольку на электрон действует только электрическая сила F (силу тяжести не учитываем, т.к. она пренебрежимо мала), то, используя второй закон Ньютона

$$F = ma,$$

можно найти ускорение электрона в вертикальном направлении Y , т.е.

$$ma = \frac{eU_y}{d} \quad \text{или} \quad a = \frac{eU_y}{md}. \quad (4)$$

Так как электрон движется вдоль оси X параллельно пластинам и одновременно на него действует сила F , в вертикальном направлении (ось Y), то траектория электрона имеет форму параболы (на рис. 2 пунктирная кривая). Отклонение электрона от прямолинейной траектории в направлении оси Y можно найти исходя из равноускоренного движения электрона вдоль оси Y (на рис. 2 указано Y_1), т.е.

$$Y = \frac{at^2}{2}. \quad (5)$$

Время t отклонения электрона равно времени прохождения электрона вдоль пластин, т.е.

$$t = \frac{l}{V_0}, \quad (6)$$

где l – длина пластин.

С учетом (6) и (4) уравнение (5) можно представить в виде

$$Y = \frac{eU_y}{2md} \frac{l^2}{V_0^2}. \quad (7)$$

Приближенно формула (7) справедлива и для электронного луча. Из нее видно, что отклонение Y при $l = const$, $V_0 = const$, $d = const$ зависит только от разности потенциалов U_y , приложенных между пластинами. Соотношение

$$\frac{Y}{U_y} = j_y \quad (8)$$

называется *чувствительностью*. Такое же выражение, используя формулы (1-6), можно получить для вертикальных пластин. Для них отклонение траектории электрона будет происходить вдоль оси X , тогда по аналогии с формулой (8)

$$X = \frac{eU_x}{2md} \frac{l^2}{V_0^2} \quad (9)$$

и

$$j_x = \frac{X}{U_x}, \quad (10)$$

где U_x – разность потенциалов между вертикальными пластинами. В дальнейшем разность потенциалов между пластинами будем считать равной напряжению.

Величины

$$j_x = \frac{X}{U_x}, \quad j_y = \frac{Y}{U_y} \quad (11)$$

называются чувствительностями к напряжению соответственно в направлениях осей X и Y . **Чувствительность трубки** по напряжению, при заданном напряжении 2-го анода, представляет собой величину отклонения электронного луча на экране (в мм), получающегося при изменении напряжения, приложенного к отклоняющим пластинам, на 1 вольт.

При постоянном анодном напряжении величины j_x и j_y для данной электронно-лучевой трубки постоянны.

Пройдя отклоняющую систему, электронный луч движется в расширенной части баллона, и электроны в конце пути попадают на экран 9 трубки. Эта часть баллона с внутренней стороны покрыта люминофором – веществом, способным светиться под воздействием бомбардирующих его электронов. При попадании электронного луча на экран люминофор возбуждается и на экране трубки появляется небольшое светящееся пятно, видимое снаружи через стекло баллона.

Если напряжения на отклоняющих пластинах изменяются, то электронный луч, а следовательно, и светящееся пятно на экране перемещаются, описывая траекторию в соответствии с законом изменения напряжения на отклоняющих пластинах. Таким образом, закон изменения напряжения на отклоняющих пластинах может визуально наблюдаться на экране электронно-лучевой трубки.

Генератор развертки. Генератор развертки представляет собой электронное устройство, позволяющее получить напряжение развертки. Если исследуемое напряжение имеет периодический характер $U_y = U_0 \sin \omega t$, то для наблюдения на экране формы кривой его подводят к пластинам Y, а на пластины X подают периодическое напряжение развертки $U_x = f(t) = f(t + T)$, изменяющееся по какому-либо временному, желательно простому закону, где T – период развертки. Обычно напряжение развертки, используемое в осциллографах, изменяется со временем либо по линейному, либо по синусоидальному закону. На рис. 3 в качестве примера линейного развертывающего напряжения изображено так называемое пилообразное напряжение.

Пилообразным оно называется потому, что форма его кривой напоминает зубцы пилы. Это напряжение характеризуется тем, что его увеличение прямо пропорционально времени, и рост напряжения происходит в течение времени t_1 .

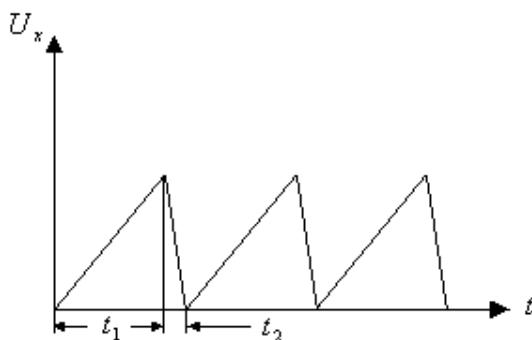


Рис. 3

При линейном увеличении напряжения электронный луч с экрана осциллографа уходит из исходного положения медленно. Спад напряжения от наибольшего его значения до исходной величины происходит в течение времени t_2 . Так как $t_2 \ll t_1$, то спад напряжения происходит практически мгновенно. Следовательно, электронный луч также мгновенно возвращается в исходное положение. Период развертки равен $T = t_1 + t_2$.

Если периоды исследуемого напряжения и напряжения развертки кратны друг другу, то на экране мы получим неподвижное изображение. В противном случае изображение на экране осциллографа будет передвигаться.

На рис. 4 приведена блок-схема осциллографа, основными узлами которого являются электронно-лучевая трубка, усилители напряжения U_x , U_y , генератор пилообразного напряжения, блок питания. Исследуемое напряжение U_y подается непосредственно через усилитель на вертикально отклоняющие пластины. На вторую пару пластин подается напряжение от какого-либо постороннего источника или пилообразное напряжение от генератора развертки.

Регулировка яркости и фокусировки луча, а также его начальное смещение по вертикали и горизонтали осуществляются с помощью переменных сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_4 .

На лицевой панели осциллографа расположены все органы управления с соответствующими надписями.

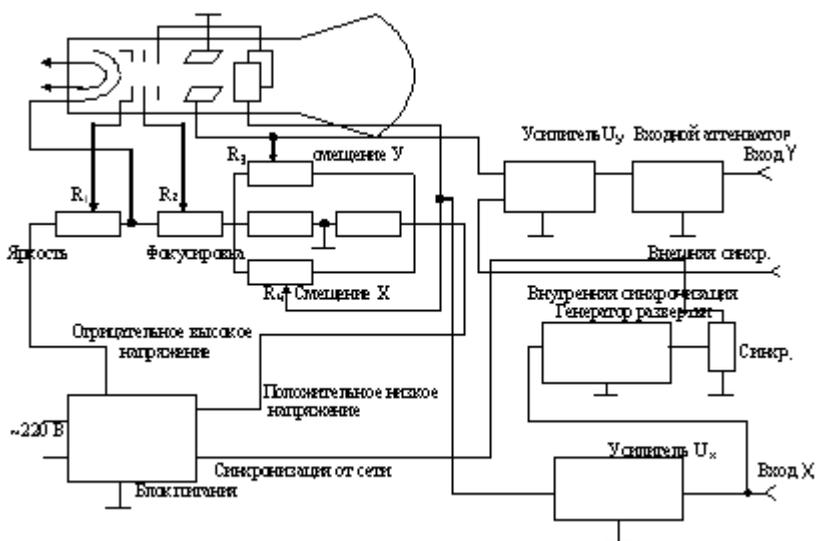


Рис. 4

Ход работы

Упражнение 1. Определение чувствительности отклоняющих пластин трубки осциллографа.

1. Установить переключатели X и Y (рис. 5) в верхнее положение.

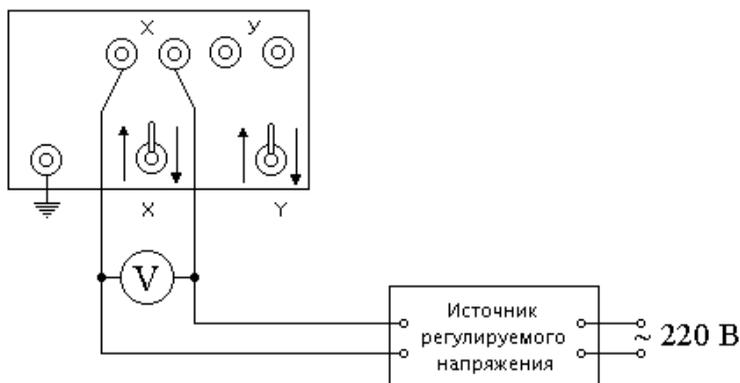


Рис. 5

2. Включить генератор развертки, устанавливая рукоятку «диапазон частот» в положение «выкл». Включить осциллограф и вывести световое пятно в центр координатной сетки с помощью рукояток: «ось Y» - вверх-вниз, «ось X» - влево-вправо.

3. Подключить к клеммам X источник напряжения и вольтметр в соответствии с рис. 5 и подать последовательно напряжение $U_x = 15 \text{ В}$, 20 В , 25 В , 30 В . Для каждого значения измерить по координатной сетке длину горизонтальной световой линии l_x в мм. То же самое повторить, подключая источник напряжения к клеммам Y.

4. Вычислить чувствительность горизонтальных отклоняющих пластин по формуле

$$j_x = \frac{l_x}{2U_x}. \quad (12)$$

5. Аналогично определить чувствительность вертикально отклоняющих пластин:

$$j_y = \frac{l_y}{2U_y}, \quad (13)$$

где U_y – напряжение на пластинах «Y», определяемое по вольтметру при постоянном токе; l_y – длина вертикальной линии на экране, мм.

6. Результаты измерения занести в таблицы.

В случае работы с источником переменного напряжения:

$$U_x = \sqrt{2}U_{xe}, \quad U_y = \sqrt{2}U_{ye}, \quad (14)$$

где U_{xe} и U_{ye} – эффективные напряжения, измеряемые вольтметром переменного тока.

Таблица

№ п/п	Напряжение, поданное на пластины		Длина линии на экране l_x , мм	Чувствительность трубки j_x , мм/В	Средняя чувствительность трубки $\langle j_x \rangle$, мм/В
	U_{xe} , В	U_x , В			

В данной работе, используется переменное напряжение, поэтому в рабочие формулы (12), (13), подставляем (14).

Аналогичную таблицу составляют для определения j_y , мм/В.

Упражнение 2. Наблюдение на экране осциллографа синусоидально меняющегося напряжения.

1. Переключатели X и Y осциллографа перевести в нижнее положение, при этом отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки подключить к выходам усилителей U_x и U_y осциллографа.

2. Переключатель «синхронизация» поставить в положение «внутри» или «от сети».

3. На вход вертикального усилителя U_y через клеммы «вход Y» и « \perp » (на лицевой панели) от источника напряжения подать переменное синусоидальное напряжение величиной 30 В.

4. Рукоятками ослабления «1:10» либо «1:100» и «усиление Y» отрегулировать удобный размер изображения по вертикали примерно 0,7 от размера экрана.

5. Переключателем «диапазон развертки» и рукояткой «частота плавно» добиться того, чтобы на экране было видно несколько периодов синусоиды. Величина изображения по горизонтали задается рукояткой «усиление X». Окончательной стабильности изображения добиваются рукоятками «частота плавно» и «синхронизация» или «амплитуда синхронизации».

6. Полученную синусоиду зарисовать.

7. Устанавливая напряжение в 25, 20, 15 В, проследить за изменением формы кривой на экране. Синусоиды, соответствующие указанным напряжениям, зарисовать на тех же осях, что и 30 В.

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Назовите основные узлы осциллографа и укажите их назначение.
3. Что называется чувствительностью электронно-лучевой трубки по напряжению?
4. Оцените погрешность метода измерений чувствительности пластин осциллографа.

Вопросы для защиты работы

1. Каковы устройство и принцип действия осциллографа?
2. Выведите формулу чувствительности j_x и j_y .
3. Объясните устройство и принцип работы электронно-лучевой трубки.
4. Почему подается пилообразное напряжение на вертикально отклоняющие пластины?
5. Каково практическое использование осциллографа?
6. Каковы Ваши критические замечания по данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 35

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО ТРИОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Цель работы - изучение работы трехэлектродной лампы, снятие ее характеристик и определение параметров.

Приборы и принадлежности: трехэлектродная лампа, миллиамперметр, вольтметр, реостат, источник тока, соединительные провода.

Снятие семейства анодных и анодно-сеточных характеристик вакуумного триода и определение его параметров

Триодом называется электронный вакуумный прибор, у которого в пространстве между анодом и катодом помещен третий электрод - *сетка*. Конструкция триода показана на рис. 1. Катод 1 и анод 3 у него устроены так же, как и у диодов (см. описание в работе № 42).

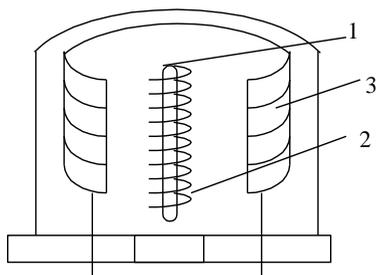


Рис. 1

При наличии сетки 2 количество электронов, достигающих анода, а следовательно, и сила анодного тока зависит не только от величины анодного напряжения, но и от величины и знака потенциала сетки относительно катода.

Изменение потенциала на сетке оказывает большее влияние на анодный ток, чем такое же изменение на аноде, так как сетка находится гораздо ближе к катоду, чем к аноду. Если к сетке приложить положительный потенциал относительно катода, то поток электронов, испускаемых катодом, будет ускоряться; если потенциал сетки отрицательный, то поток электронов будет тормозиться. Наконец, при некотором отрицательном значении потенциала сетки число электронов, пролетающих сквозь сетку к аноду, становится незначительным и поэтому ток практически равен нулю. В этом случае говорят, что лампа заперта. Кривая, показывающая зависимость между I_a и U_c при $U_a = \text{const}$, изображена на рис. 2б. Она называется **сеточной** характеристикой, а кривая зависимости анодного тока I_a от анодного напряжения U_a , при постоянном сеточном потенциале $U_c = \text{const}$, называется **анодной** (рис. 2а). Для различных U_a запирающий сеточный потенциал будет различным, он тем больше по абсолютной величине, чем больше U_a . Поэтому для каждого U_a мы имеем другую сеточную характеристику. Набор сеточных характеристик, получаемых для различных значений анодного напряжения, называют *семейством сеточных характеристик*. Сетка позволяет управлять режимом работы лампы, и поэтому ее называют *управляющей сеткой*.

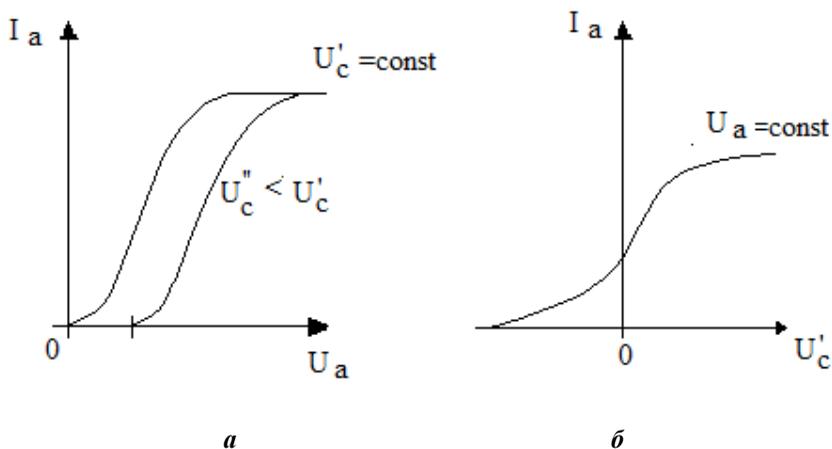


Рис. 2

Параметры вакуумного триода

Параметрами трехэлектродной лампы называются величины, определяющие ее свойства и пригодность для тех или иных целей.

Анодный ток I_a трехэлектродной лампы при постоянном напряжении накала является функцией двух переменных: анодного напряжения U_a и сеточного напряжения U_c . Изменение анодного тока может быть вызвано изменением как сеточного напряжения, так и анодного, что и является характерной особенностью данного типа ламп.

Внутреннее сопротивление

Величина

$$\left(\frac{dU_a}{dI_a} \right)_{U_c} = R_i \quad (1)$$

называется дифференциальным внутренним сопротивлением лампы.

Внутреннее сопротивление R_i показывает, на сколько вольт надо изменить напряжение на аноде лампы, чтобы ее анодный ток изменился на 1 мА при неизменном потенциале на управляющей сетке.

Крутизна сеточной характеристики

Величина

$$\left(\frac{dI_a}{dU_c} \right)_{U_a} = S \quad (2)$$

показывает, на сколько миллиампер изменяется ток при изменении потенциала сетки на 1 В, если анодное напряжение постоянно.

Коэффициент усиления

Коэффициент усиления μ представляет собой отношение изменения анодного напряжения к изменению напряжения сетки, дающих одинаковые изменения анодного тока:

$$\mu = \frac{dU_a}{dU_c} \quad (3)$$

Очевидно, $\mu = S \cdot R_i$.

Все три параметра имеют смысл только при работе лампы ниже тока насыщения на наклонном участке характеристики, так как в области тока насыщения изменение потенциала анода и сетки не вызывает изменения анодного тока. Ниже показано, как практически определить параметры лампы μ, S, R .

Имея, по крайней мере, две характеристики, можно легко определить параметры лампы. Пусть одна из характеристик снята при анодном напряжении $U'_a = 120\text{В}$, а другая при $U''_a = 80\text{В}$. В области прямолинейных участков этих характеристик строим треугольник DEF (рис. 3), где DE проводим параллельно оси абсцисс, EF – параллельно оси ординат.

Обозначим абсциссы точек D, E, F соответственно d, e (абсциссы точек F и E совпадают), ординаты - f, e (ординаты точек D и E совпадают).

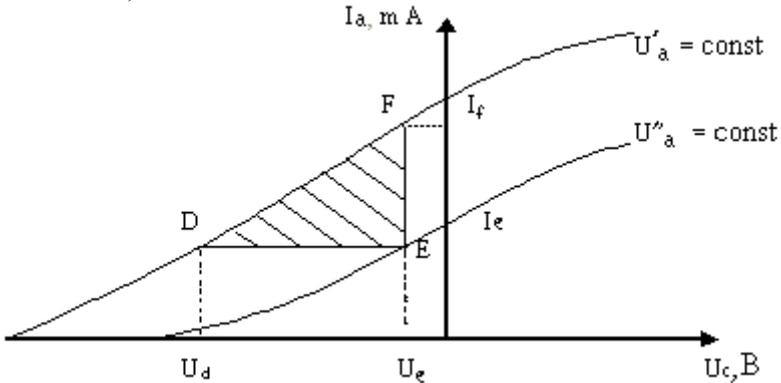


Рис. 3

Определение крутизны сеточной характеристики

Рассмотрим левую характеристику, снятую при U'_a . Если напряжение на сетке U_c возрастает от « U_d » до « U_e », I_a увеличивается от « I_e » до « I_f ». Значит, при $U_a = \text{const}$

$$\Delta U_c = U_f - U_d;$$

$$\Delta I = I_d - I_f; S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \right)_{U_a} = \frac{I_f - I_e}{U_e - U_d} \left[\frac{\text{мА}}{\text{В}} \right].$$

Определение внутреннего сопротивления

Точки F и E принадлежат к различным характеристикам, но сняты при одном и том же потенциале на сетке. Ординаты точек E и F показывают силы тока соответственно при $U_a = U'_a$ и при $U_a = U''_a$. Так как для этих точек $\Delta U_c = 0$, то увеличение силы тока от «I_e» до «I_f» обусловлено только изменением анодного напряжения, тогда

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_{acconst}} = \frac{U'_a - U''_a}{I_f - I_e} \text{ [кОм]}.$$

Определение коэффициента усиления

Изменить силу тока от «I_e» до «I_f» можно двумя путями:

- 1) увеличивая U_c от «U_d» до «U_e» при $U_a = U''_a = \text{const}$;
- 2) увеличивая U_a от «U''_a» до «U'_a» при $U_c = \text{const}$.

Отношение ΔU_a к ΔU_c , дающее одинаковые изменения силы анодного тока, и есть коэффициент усиления, т.е.

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{U'_a - U''_a}{U_e - U_d}.$$

Рассмотренные выше основные параметры лампы характеризуют статический режим, т.е. такой, когда нагрузочное сопротивление в цепи отсутствует. Их называют поэтому статическими параметрами. Обычно в анодные цепи включены **нагрузочные сопротивления** (рис. 4). В этом случае режим лампы и ее параметры называются *динамическими*.

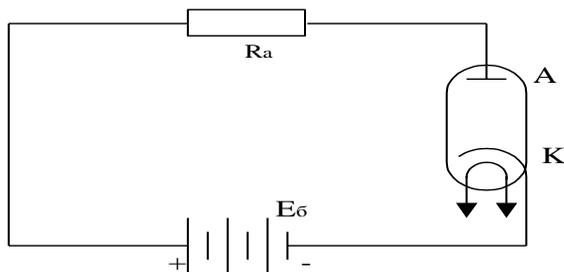


Рис. 4

Для исследования трехэлектродной лампы применяется установка, принципиальная схема которой изображена на рис. 5.

В данной работе определяются только статические параметры лампы.

Ход работы

Упражнение 1. Снятие статических анодных характеристик.

1. Собрать схему (рис. 5), соблюдая полярность.
2. Включить источник питания. Напряжение на сетке установить равным нулю, т.е. $U_c = 0$.

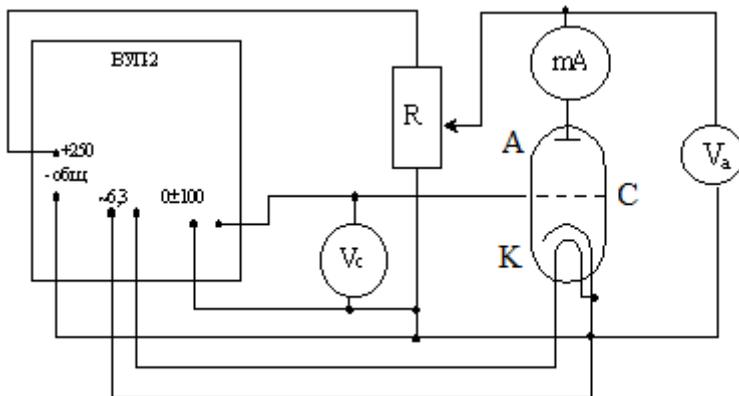


Рис. 5

3. Снять анодную характеристику, повышая анодное напряжение U_a от 0 В до 200 В через 20 В.

4. Провести те же измерения при различных значениях напряжения на сетке ($U_c = -2$ В; $U_c = 2$ В). Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

	U_a , В									
$U_c = 0$ В	I_a , мА									
$U_c = -2$ В	I_a , мА									
$U_c = 2$ В	I_a , мА									

5. Построить семейство статических анодных характеристик, откладывая по оси абсцисс значения U_a в вольтах, а по оси ординат значения I_a в миллиамперах (см. рис.2 а).

Упражнение 2. Снятие сеточных характеристик.

1. С помощью реостата R_1 установить значение анодного напряжения в пределах $80 \div 160$ В.

2. Изменяя сеточное напряжение через 1В и поддерживая анодное напряжение на выбранном уровне, снять зависимость тока от напряжения на сетке.

3. Выбрав значение анодного напряжения на другом уровне, повторить измерения, указанные в предыдущем пункте. Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2

	$U_c, В$							
$U_a = \dots, В$	I_a, mA							
$U_a = \dots, В$	I_a, mA							

4. По результатам измерений построить сеточные характеристики.

Упражнение 3. Определение параметров трехэлектродной лампы.

Используя семейство статических сеточных характеристик и семейство статических анодных характеристик, определить величины R_i , S , μ , руководствуясь методикой, изложенной в разделе «Параметры вакуумного триода».

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Расскажите об устройстве, принципе действия и назначении вакуумного триода.
3. Объясните физический смысл параметров трехэлектродной лампы.
4. Какой режим работы называется статическим, динамическим?

5. Оцените погрешность метода измерений параметров лампы.
6. Выберите масштаб для построения графиков.

Вопросы для защиты работы

1. Дайте анализ сеточных и анодных характеристик.
2. Как определить параметры лампы по сеточным и анодным характеристикам?
3. Каковы Ваши критические замечания по данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 36

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ФАРАДЕЯ И ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы - определение числа Фарадея и заряда электрона.

Приборы и принадлежности: электролитическая ванна с раствором медного купороса, источник постоянного тока, секундомер.

Прохождение тока через электролиты

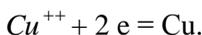
Вещества, молекулы которых в растворе или в расплаве распадаются на ионы, называются *электролитами*. Такой процесс распада называется электролитической диссоциацией. К электролитам относятся водные растворы солей, кислот, щелочей, а также расплавленные соли. Электрический ток в электролитах обусловлен движением ионов под действием внешнего электрического поля. Поэтому проводимость электролитов, в отличие от электронной проводимости металлов, принято называть ионной. Прохождение постоянного тока через электролиты связано с переносом вещества и сопровождается выделением составных частей этих веществ на электродах. Это явление называется *электролизом*.

Если ввести в электролит два электрода (металлических или угольных), соединенных с полюсами источника постоянного напряжения, и создать внешнее постоянное электрическое поле, то под действием электрических сил ионы в растворе придут в направленное движение. К аноду будут двигаться отрицательные ионы (анионы), к катоду - положительные (катионы).

Достигнув электродов, ионы разряжаются: анионы отдают аноду свои избыточные электроны, катионы восстанавливаются на катоде. Например, молекулы медного купороса CuSO_4 диссоциируют при растворении на положительные ионы Cu^{++} и отрицательные ионы SO_4^{--} .

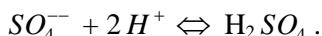
Кроме ионов Cu^{++} и SO_4^{--} раствор содержит также водородные (H^+) и гидроксильные (OH^-) ионы воды.

Ионы меди Cu^{++} разряжаются легче, чем ионы водорода H^+ , поэтому при прохождении тока на катоде будет происходить выделение меди:



Ионы SO_4^{--} труднее разряжаются, чем ионы OH^- . Поэтому при прохождении тока у анода разряжаются ионы гидроксила и выделяется кислород: $2 \text{OH}^- - 2 e = \text{H}_2\text{O} + \text{O}$, $2\text{O} \rightarrow \text{O}_2$.

Ионы SO_4^{--} с ионами H^+ образуют у анода раствор серной кислоты:



Иначе протекает процесс, если анод изготовлен из меди. В этом случае разряд ионов происходит только у катода. У анода же, наоборот, ионы металла переходят в раствор.

Объяснить это можно тем, что атомы меди Cu теряют электрон легче, чем ионы OH^- , в этом случае вместо выделения кислорода будет происходить переход с анода в раствор ионов Cu^{++} , т.е. $\text{Cu} - 2 e = \text{Cu}^{++}$.

Следовательно, электролиз CuSO_4 при медном аноде сводится к переносу меди с анода на катод. В то же время количество медного купороса останется неизменным в растворе.

Законы электролиза

Пусть заряд одного иона равен Ze , где e – элементарный заряд, Z – валентность иона, т.е. число электронов, отданных или приобретенных при диссоциации каждым атомом. Заряд, отдаваемый электроду равен

$$q = n \cdot Z \cdot e, \quad (1)$$

где n – число ионов.

С другой стороны, масса M выделившегося на электроде вещества равна

$$M = n \cdot m, \quad (2)$$

где m – масса одного иона.

Из формул (1) и (2) находим

$$M = \frac{m}{Z \cdot e} \cdot q. \quad (3)$$

Известно, что в одном моле ν любого вещества содержится одинаковое число атомов: $N = N_A$,

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \text{ (число Авогадро)}.$$

Тогда масса иона (массами двух оторванных от атома электронов пренебрегаем) будет равен

$$m = \frac{\mu}{N_A}, \quad \text{где } \mu \text{ - молярная масса.} \quad (4)$$

Подставим выражение (4) в (3), получим

$$M = \frac{\mu}{N_A \cdot Z \cdot e} \cdot q. \quad (5)$$

Величина

$$\frac{\mu}{N_A \cdot Z \cdot e} = K, \quad (6)$$

постоянная для каждого вещества, называется *электрохимическим эквивалентом* данного вещества. Таким образом, масса M выделившегося на электроде вещества пропорциональна величине заряда q , прошедшего через электролит (первый закон Фарадея).

Величина заряда q , прошедшего через электролит, равна произведению силы тока I на время t его прохождения: $q = I \cdot t$.

Поэтому электрохимический эквивалент (с учетом (5) и (6)) может быть рассчитан по формуле

$$K = \frac{M}{I \cdot t} = \frac{M}{q}. \quad (7)$$

Из формулы (6) находим

$$A = \frac{\mu}{Z} = N_A \cdot e \cdot K . \quad (8)$$

Величина $\frac{\mu}{Z} = A$ называется *химическим эквивалентом* вещества.

Из уравнения (8) следует, что химический эквивалент веществ пропорционален его электрохимическому эквиваленту (второй закон Фарадея):

$$K = \frac{1}{F} A . \quad (9)$$

Постоянная величина F называется числом Фарадея.

Выражение (7) можно переписать в виде

$$M = \frac{1}{F} \frac{\mu}{Z} q . \quad (10)$$

Для того чтобы на электроде выделилось количество вещества, численно равное A, через электролит надо пропустить заряд $q = F$.

Следовательно, число Фарадея F численно равно величине заряда, при прохождении которого через электролит на электроде выделяется масса вещества, численно равная A.

Из выражений (8), (9) следует, что

$$F = \frac{\mu}{ZK} = N_A e . \quad (11)$$

Заряд одновалентного иона равен заряду электрона по абсолютной величине. Поэтому заряд электрона может быть вычислен по формуле

$$e = \frac{F}{N_A} . \quad (12)$$

Ход работы

1. Медный электрод, используемый в качестве катода, просушить на электроплитке в течение 10 минут и взвесить на лабораторных весах. Значение измеренной массы M_1 занести в таблицу 1.

2. Поместить в стеклянную ванну с электролитом медные электроды – катод и анод. К отрицательной клемме источника постоянного тока подключить катод, к положительной – анод (см. рис. 1).

ВНИМАНИЕ! В предлагаемой лабораторной установке источник постоянного тока имеет возможность работать в режиме стабилизации тока, т.е. прибор автоматически поддерживает силу тока, заданную с помощью декадного переключателя тока, независимо от величины сопротивления нагрузки. О работе источника питания в режиме стабилизации тока свидетельствует свечение соответствующей лампочки. Если указанная лампочка не светится, следует с помощью декадного переключателя напряжения увеличить значение набранной величины напряжения до зажигания лампочки стабилизации тока. Ориентировочное значение набранной величины напряжения перед включением прибора равно 20 В. Значение величины тока задается руководителем работы.

3. Включить источник питания, одновременно пустить секундомер, убедившись в работе источника питания в режиме стабилизации тока. Пропускать ток через электролит 30-40 минут.

4. Выключить источник питания и секундомер, катод просушить на электроплите в течение 10 минут и с помощью весов определить его массу M_2 . Разность $M_1 - M_2$ дает приращение массы катода M . Результаты измерений занести в таблицу.

5. По формулам (7), (11), (12) вычислить величины электрохимического эквивалента, числа Фарадея и заряда электрона. При расчетах следует принять, что для меди $\mu = 63,5 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и в соединении медь двухвалентна – $Z = 2$.

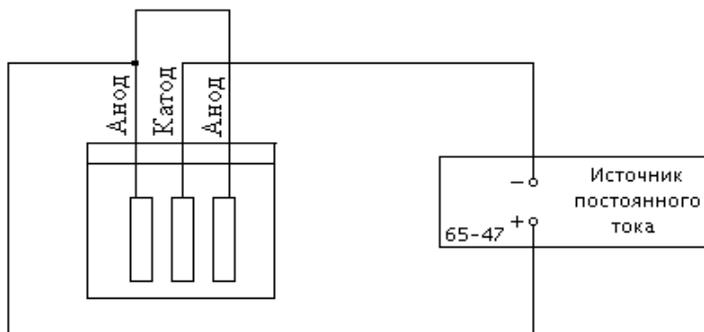


Рис. 1

Результаты вычислений занести в таблицу.

Таблица 1

M_1 , кг	M_2 , кг	M , кг	I , А	t , с	K , кг/Кл	F , Кл/моль	e , Кл

Вопросы для допуска к работе

1. Что называется электрохимическим эквивалентом? Что называется химическим эквивалентом? Каков их физический смысл?
2. Определите цель работы.
3. Опишите рабочую установку и запишите рабочие формулы.
4. Оцените погрешность данного метода измерений числа Фарадея и заряда электрона.

Вопросы для защиты работы

1. Какие проводники называются проводниками первого и второго рода?
2. Сформулируйте законы электролиза.
3. Какова связь между числом Фарадея, химическим и электрохимическим эквивалентом вещества и каков физический смысл числа Фарадея F ?
4. Можно ли определить электрохимический эквивалент, если через ванну пропустить переменный ток?
5. После проведения опыта Вы обнаружили, что ошибочно изменена полярность электродов. Можно ли в этом случае определить электрохимический эквивалент?
6. Каковы Ваши критические замечания по данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 37

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ RC-ГЕНЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы - изучение устройства и принципа действия осциллографа; исследование режима работы релаксационного RC-генератора.

Приборы и принадлежности: электронный осциллограф, релаксационный RC-генератор, источник питания.

Перед выполнением данной работы необходимо подробно ознакомиться с работой № 34.

Принципиальное устройство и работа осциллографа

Электронный осциллограф – это прибор, предназначенный для визуального наблюдения и регистрации, а также измерения различных параметров периодических и непериодических электрических сигналов, позволяющий определять их форму, величину, временные и частотные соотношения. Например, с помощью осциллографа можно измерять силу тока, напряжение и их изменение во времени, сдвиг фазы между электрическими сигналами, сравнивать частоты и амплитуды различных сигналов.

Электронный осциллограф является одним из самых распространенных измерительных приборов, он располагает возможностью графического представления исследуемых процессов (данная форма наиболее удобна для восприятия), имеет большое входное сопротивление, высокую чувствительность, а также малую инерционность и широкий частотный диапазон. Он широко применяется при изучении переходных режимов в электрических цепях. Если имеется возможность преобразовывать неэлектрические величины в напряжение электрического сигнала, осциллограф применяют для исследования физических процессов в механике, теплотехнике, диагностике двигателей и в других областях науки и техники.

На рис. 1 представлена схема осциллографа, основными узлами которого являются: электронно-лучевая трубка 5 со схемой управления лучом 4, входной каскад 1 и усилитель канала вертикального отклонения луча 2, блок синхронизации 6, калибратор 3,

генератор развертки 7, усилитель канала горизонтального отклонения луча 8 и блок питания 9.

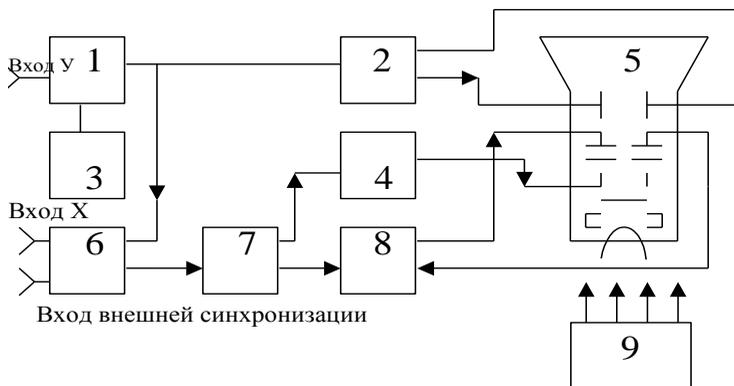


Рис. 1

Исследуемый сигнал подается на вход "У" входного каскада 1 канала вертикального отклонения луча. Входной каскад обеспечивает минимальное влияние осциллографа на исследуемый сигнал и его согласование с усилителем напряжения 2 канала. С выхода усилителя напряжения, определяющего предельную чувствительность осциллографа, исследуемый сигнал подается на вертикально-отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки 5. Исследуемый сигнал может также непосредственно подаваться на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки.

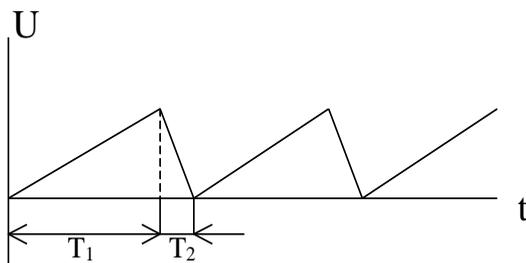


Рис. 2

Генератор развертки 7 генерирует напряжение, которое линейно изменяется со временем (рис. 2), усиливается усилителем 8

канала горизонтального отклонения луча и подается на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. Под действием этого напряжения электронный луч в течение времени T_1 перемещается по экрану осциллографа слева направо пропорционально времени и практически мгновенно за время $T_2 \ll T_1$ возвращается обратно. При совпадении периодов напряжения развертки исследуемого сигнала или кратном их соотношении, что достигается регулировкой частоты развертки органами управления, на экране осциллографа будет наблюдаться график изучаемого процесса.

Неподвижность изображения из-за нестабильности частоты генератора не может быть сохранена в течение длительного времени. Поэтому генератор развертки синхронизируется исследуемым сигналом. Формирование сигнала синхронизации прямоугольной формы осуществляется блоком синхронизации 6 независимо от величины и формы входного сигнала. Благодаря этому достигается устойчивый запуск генератора развертки. Для запуска может использоваться внешний сигнал, подаваемый на гнездо "вход синхронизации".

Контроль коэффициента развертки и коэффициента вертикального отклонения луча осуществляется с помощью калибратора 3, встроенного в осциллограф вырабатывающего прямоугольные импульсы заданной амплитуды и длительности.

Питание блоков осциллографа осуществляется стабилизированным напряжением от блока питания 9, обеспечивающего устойчивое напряжение питания при колебаниях напряжения в сети.

Релаксационный RC-генератор

RC-генератор релаксационных колебаний состоит из элемента, накапливающего энергию конденсатора, и активного сопротивления R . Схема простейшего генератора изображена на рис. 3. При подаче постоянного напряжения на вход генератора конденсатор C заряжается через сопротивление R до напряжения зажигания U_3 неоновой лампы L . В момент зажигания неоновая лампа начинает проводить ток, и конденсатор быстро разряжается через нее. При некотором напряжении U_n (напряжение погасания) лампа погаснет,

ее сопротивление резко возрастет и разряд конденсатора прекратится. Начнется новый цикл заряда конденсатора. Колебания напряжения на конденсаторе имеют пилообразную форму (рис.4).

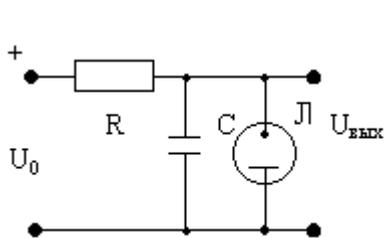


Рис. 3

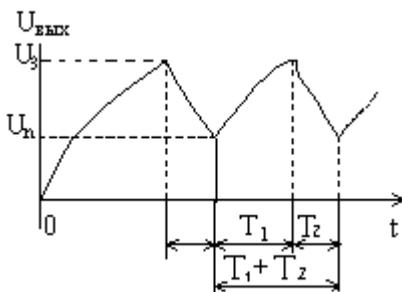


Рис. 4

Заряд конденсатора происходит за время T_1 , разряд - за время T_2 , причем $T_1 \gg T_2$. Период колебаний напряжения на конденсаторе $T = T_1 + T_2 \approx T_1$.

Определим закон изменения напряжения на конденсаторе. По закону Кирхгофа

$$U_0 = U_R + U_C, \quad (1)$$

где U_0 – напряжение, поданное на RC-цепь; U_R – напряжение на сопротивлении R при протекании через него зарядного тока i , равное

$$U_R = iR = \frac{dq}{dt} R,$$

где q – заряд, протекающий в цепи; U_C – напряжение на конденсаторе, которое определяется формулой

$$U_C = \frac{q}{C}. \quad (2)$$

Поэтому уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{dq}{dt}R + \frac{q}{C} = U_0. \quad (3)$$

После введения подстановки $Z = q - U_0C$ уравнение (3) сведется к однородному дифференциальному уравнению с разделяющимися переменными

$$\frac{dZ}{dt} + \frac{Z}{RC} = 0,$$

интегрируя которое и возвращаясь к переменной q , можем записать

$$\ln(q - U_0C) = -\frac{1}{RC}t + \ln q_0.$$

Пропотенцируем полученное выражение:

$$q = U_0C + q_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right).$$

Постоянную интегрирования q_0 определим из начального условия; в начальный момент времени заряд на конденсаторе равен 0, т.е. $q = 0$ при $t=0$.

Тогда $q_0 = -U_0C$.

Соответственно заряд конденсатора меняется во время его зарядки по закону

$$q(t) = U_0C \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right),$$

а напряжение

$$U_C(t) = \frac{q(t)}{C} = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right), \quad (4)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи.

Величина τ равна времени, необходимому для зарядки конденсатора до ~ 0.67 от его полного заряда при данном напряжении U_0 . Полагая в (4) $t = \tau$, получим

$$U_{C/t=\tau} = U_0(1 - e^{-1}) = 0,67U_0.$$

Период релаксационных колебаний зависит от параметров схемы (от постоянной времени $\tau = RC$) и от потенциалов зажигания и погасания лампы. Пусть лампа гаснет в момент времени

t_1 при потенциале U_n на конденсаторе, а загорается в момент времени t_2 при потенциале U_3 :

$$U_n = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) \right),$$

откуда

$$U_3 = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t_2}{\tau}\right) \right),$$

$$RC \cdot \ln \frac{U_0 - U_n}{U_0 - U_3} = T_1 \approx T. \quad (5)$$

Ход работы

1. Подготовить осциллограф к работе в соответствии с описанием прибора.

2. Измерить напряжение "зажигания" U_3 и напряжение "погасания" U_n неоновой лампы, а также напряжение U_0 на входе генератора.

Для этого при отсутствии напряжения на входе RC генератора установить луч ручкой вертикального перемещения в нижнюю часть экрана, совместив его с последним делением шкалы.

После включения напряжения питания генератора получить изображение 3÷5 периодов релаксационных колебаний, используя "открытый" вход осциллографа и входной делитель «1÷10». Изображение должно быть устойчивым и иметь наибольший размер в пределах рабочей части шкалы прибора.

3. Измерить время заряда T_1 и время разряда T_2 конденсатора, используя "закрытый" вход осциллографа. Изображение измеряемого временного интервала должно занимать почти весь экран осциллографа, что достигается выбором диапазона развертки.

4. Снять, используя "открытый" вход, зависимость $U(t)$ напряжения на конденсаторе при его зарядке от времени.

При подготовке прибора к измерению при отключенном напряжении питания RC-генератора установить луч на нижнем делении шкалы. После включения питания RC-генератора получить наибольший размер исследуемого временного интервала в преде-

лах рабочей части экрана соответствующим выбором диапазона развертки и коэффициента отклонения луча.

Изображение исследуемого сигнала перевести на кальку, наложив ее на экран. Отметить на ней оси координат и записать коэффициент отклонения луча и диапазон развертки. При необходимости изображение исследуемого сигнала можно снять по точкам, определив координаты 10 точек кривой.

5. Повторить измерения для двух других значений сопротивления R.

6. Обработать полученные результаты:

- рассчитать постоянную времени RC-цепи $\tau_{\text{расч}}$ для каждого случая по известным значениям R и C;

- рассчитать значение T_I по формуле (5); оценить погрешность расчета T_I и прямых измерений T_I , используя сведения о погрешности измерения амплитуды и временных интервалов; сравнить рассчитанные и измеренные значения периода колебаний RC-генератора; определить частоту колебаний генератора $\nu = 1/T = 1/T_I$;

- сравнить измеренное время заряда T_I и разряда T_2 конденсатора; определить, справедливо ли соотношение $T_I \gg T_2$, считая, что оно удовлетворительно выполняется при отношении $T_2/T_I \leq 0,1$; оценить погрешность измерения периода колебаний генератора, вызванную пренебрежением T_2 ;

- определить, выполняется ли закон изменения напряжения (4) на конденсаторе, для чего построить зависимость

$$\ln \frac{U_0 - U_C}{U_0} = f(t),$$

используя полученные осциллограммы $U = f(t)$.

Из формулы (4) следует, что величина

$$\ln \frac{U_0 - U_C}{U_0} = -\frac{1}{\tau} t$$

линейно зависит от времени, следовательно, при выполнении закона (4) построенные в координатах $\ln[(U_0 - U_C)U_0]$, t графики должны

представлять собой прямые линии с наклоном $-\frac{1}{\tau}$.

При выполнении закона (4) определить по графикам постоянные времена RC-цепей. Сравнить полученные значения τ , с результатами $\tau_{расч}=RC$.

Полученные результаты занести в рекомендуемые таблицы (табл. 1, 2, 3).

Таблица 1

Исследование режима RC-генератора

№	R Ом	C мкФ	U ₀		U _n		U ₃		T ₁		T ₂	
			дел	В	дел	В	дел	В	дел	с	дел	с
1												
2												
3												

Величина времени развертки на деление: T_p=

Погрешность измерения времени: E_t=

Погрешность измерения амплитуды: E_A=

Таблица 2

Расчеты периода и частоты RC-генератора

№	R Ом	C мкФ	$\tau_{расч}$ с	T _{1расч} с	$\Delta T_{расч}$ с	ν Гц	T ₂ /T ₁ %	T ₂ /(T ₁ +T ₂) %
1								
2								
3								

Таблица 3

Определение закона изменения U от t при зарядке конденсатора

№	U _c		t		$\ln \frac{U_0 - U_c}{U_0}$	$\tau_{э}, c$	$\frac{\tau_{э} - \tau_{расч}}{\tau_{расч}}, \%$
	мм	мВ	мм	с			
1							
2							
3							

Величина времени развертки на 1 мм: $T_p =$

Вопросы для допуска к работе

1. Поясните цель работы.
2. Объясните принцип действия RC-генератора и временную диаграмму его работы.
3. Укажите измеряемые величины и способ их измерения.

Вопросы для защиты работы

1. Поясните принцип действия осциллографа, перечислите его основные узлы.
2. Поясните принцип действия релаксационного RC-генератора и выведите зависимость $U = f(t)$ для зарядки конденсатора.
3. Выведите формулу периода релаксационных колебаний.
4. Дайте анализ полученных результатов.
5. Выведите формулу погрешностей расчета периода колебаний RC-генератора.
6. Объясните методику измерений амплитудных и временных интервалов осциллографом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 38

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы - получить распределение потенциала для электрических полей, моделируемых с помощью электролитической ванны.

Приборы и принадлежности: источник питания, осциллограф, ванна с электролитом, набор электродов.

Моделирование электростатических полей

Количественными характеристиками электростатического поля являются: силовая – напряженность \vec{E} поля; энергетическая – потенциал ϕ поля.

Электростатическим полем называется поле, созданное неподвижными и не изменяющимися со временем по величине зарядами.

Напряженностью E электростатического поля называется векторная физическая величина, равная отношению силы, действующей на положительный точечный пробный заряд q , к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Единица измерения напряженности $E = \left[\frac{H}{Кл} \right] = \left[\frac{В}{м} \right]$.

Смысл вектора \vec{E} : если $q = +1$, то $E = F$, т.е. напряженность E численно равна силе, действующей на положительный единичный точечный заряд, помещенный в данную точку электростатического поля. Напряженность \vec{E} поля подчиняется **принципу суперпозиции**, т.е. напряженность \vec{E} результирующего электростатического поля, созданного системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым электрическим зарядом системы в данной точке, т.е.

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i, \quad (2)$$

где \vec{E}_i – вектор напряженности электростатического поля, создаваемого i -м зарядом.

Потенциалом ϕ точки электростатического поля называется скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии точечного заряда, помещенного в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\phi = \frac{W_n}{q}. \quad (3)$$

Единица измерения $\phi = \left[\frac{Дж}{Кл} \right] = [В]$.

Потенциал ϕ поля, создаваемого любыми зарядами, определяется формулой

$$\phi = const + \int_r^{r_0} \vec{E} \cdot d\vec{r}, \quad (4)$$

где r_0 – радиус-вектор фиксированной точки, где потенциал постоянен и неизвестен, т.е. равен const.

В зависимости от условий физической задачи неизвестную const в точке с радиус-вектором r_0 принимаем равной нулю, либо некоторому значению.

Рассмотрим пример. Напряженность E в точке поля, созданного точечным зарядом, равна

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (5)$$

Подставим (5) в (4). Если учитывать, что при $r_0 \rightarrow \infty$ const=0, потенциал в точке поля будет равен

$$\varphi = 0 + \int_r^{\infty} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (6)$$

Поскольку одно и то же электростатическое поле характеризуется двумя физическими величинами: напряженностью E и потенциалом φ , то между ними существует количественная связь, которая определяется формулой

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\frac{d\varphi}{dr}} = -\vec{\nabla}\varphi. \quad (7)$$

Знак «-» показывает, что вектор напряженности \vec{E} направлен в сторону уменьшения потенциала. В декартовой системе (7) можно записать в виде

$$\vec{E} = -\left(\vec{i} \frac{d\varphi}{dx} + \vec{j} \frac{d\varphi}{dy} + \vec{k} \frac{d\varphi}{dz}\right), \quad (8)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные вектора, $\frac{d\varphi}{dx}, \frac{d\varphi}{dy}, \frac{d\varphi}{dz}$ – проекции на каждую ось градиента потенциала. Поэтому проекция вектора \vec{E} на ось x равна

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}. \quad (9)$$

Геометрическими характеристиками электростатического поля являются силовые линии и эквипотенциальные линии, или поверхности.

Силовой линией, или линией напряженности, называется линия, проведенная в электростатическом поле, в каждой точке которой касательная совпадает с вектором напряженности \vec{E} (рис. 1).

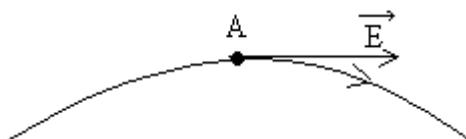


Рис. 1

Свойства силовых линий

Силовые линии электростатического поля не замкнуты, начинаются от положительного заряда и заканчиваются на отрицательном, либо уходят в бесконечность или приходят из бесконечности (на рис. 2 силовые линии обозначены сплошными линиями).

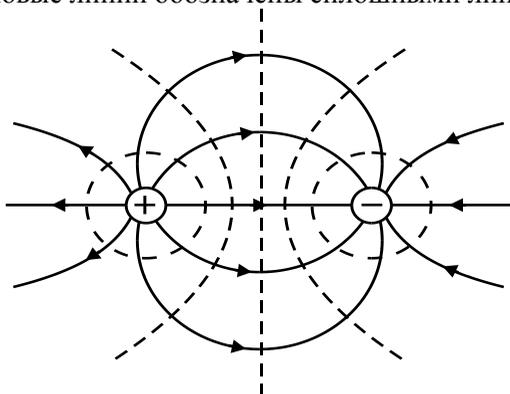


Рис. 2

Воображаемая поверхность (или линия), все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется **эквипотенциальной**. Ее уравнение имеет вид

$$\varphi(x, y, z) = \text{const.} \quad (10)$$

На рис. 2 эквипотенциальные линии показаны пунктирными линиями.

Свойства эквипотенциальных поверхностей

1. При перемещении заряда вдоль эквипотенциальной линии (поверхности) работа сил электростатического поля равна нулю.

2. Силовые линии перпендикулярно пересекают эквипотенциальные линии или поверхности (на рис. 2 показано перпендикулярное пересечение силовых и эквипотенциальных линий).

Эквипотенциальную поверхность (линию) можно провести через любую точку поля. Принято проводить поверхности таким образом, чтобы разность потенциалов для двух соседних поверхностей (линий) была всюду одна и та же. Решение этой задачи можно значительно упростить, если электрическое поле электродов смоделировать стационарным (постоянным во времени) электрическим полем тока, протекающим через электролит, а электрометр заменить на гальванометр. При этом изучается не электростатическое поле системы электродов, помещенных в вакуум, а поле токов, возникающих между электродами этой системы, если их расположить не в вакууме, а в сосуде, заполненном слабопроводящим электролитом (например, водопроводной водой) – электролитической ванне, и приложить к ним те же самые потенциалы.

Как показывают теория и эксперимент, возникающее в электролите электролитическое поле токов будет совпадать с распределением потенциалов в электростатическом поле. Измерение же распределения потенциалов в электролите можно осуществить более простым и надежным способом, чем в вакууме.

Физическое обоснование совпадения электростатического поля и поля токов в электролитической модели заключается в том, что в однородном проводнике (в данном случае в электролите), так же как в электростатическом поле, созданном системой электродов, отсутствуют связанные заряды. Поэтому, если на электроды в обоих случаях поданы одинаковые потенциалы и электропроводность среды намного меньше электропроводности вещества электродов (краевые условия одинаковы), электростатическое поле и поле токов должны обязательно совпадать.

Для сохранности тождественности электростатического поля и поля токов в электролитической ванне необходимо, чтобы электролит был слабопроводящим и однородным. Использование слабопроводящего электролита имеет важное значение в том отношении, что в нем текут слабые токи и, следовательно, не происходит заметного разогревания электролита, которое тоже может исказить поле из-за изменения электропроводности электролита при изменении температуры.

Существует еще одна причина, которая может привести к значительным погрешностям при работе с электролитической ванной. Она связана с искажением поля в электролитической ванне под влиянием граничных поверхностей (стенок, дна и поверхности

жидкости). Прежде всего необходимо устранить это влияние, расположив электроды возможно дальше от граничных поверхностей. Но тогда для проведения эксперимента придется сооружать весьма громоздкую электролитическую ванну, что также связано с большими неудобствами.

Оказывается, эту сложность легко преодолеть, если исследуемые поля обладают симметрией. Для этого электроды располагают так, чтобы линии тока, лежащие в плоскостях симметрии поля, не пересекали граничные поверхности, т.е. чтобы плоскости граничных поверхностей совпадали с плоскостями симметрии исследуемого поля. При соблюдении этого условия распределение потенциалов на граничной поверхности (например, на горизонтальной поверхности электролита) будет совпадать с распределением потенциала в плоскости симметрии исследуемого поля.

Описание рабочей установки

Рабочая установка, принципиальная электрическая схема которой приведена на рис. 3, состоит из ванны, заполненной электролитом (водопроводная вода), сменных электродов А и В, поле которых моделируется, зондового электрода С, осциллографа N, потенциометра R и понижающего трансформатора Тр.

В данной работе моделируются: поле разноименных точечных зарядов (стержневые электроды А и В), или поле плоского конденсатора (пластинчатые электроды А и В), или поле цилиндрического конденсатора (цилиндрические электроды А и В).

Переменное напряжение со вторичной обмотки трансформатора Тр подается на потенциометр R и электроды А и В. С движка потенциометра R переменное напряжение поступает на «У» вход осциллографа N, к клемме « \perp » которого подключен зондовый электрод С.

Потенциометр R выполняет роль делителя напряжения и служит для задания потенциала искомой эквипотенциальной линии. Осциллограф N применяется для измерения разности потенциалов между зондовым электродом С и движком R. При совпадении потенциалов движка и зондового электрода изображение на экране осциллографа N будет иметь вид прямой горизонтальной линии, а при выключенной развертке по оси X сожмется в точку.

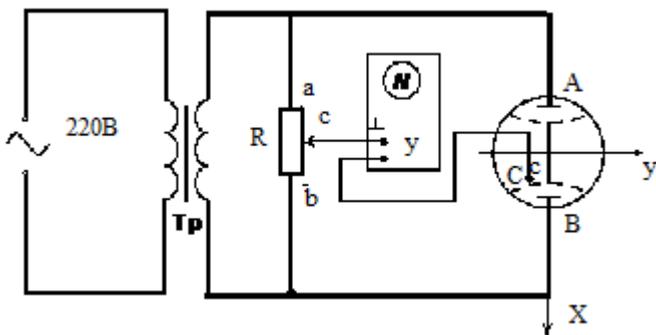


Рис. 3

Таким образом, в данной работе осциллограф является нуль-индикатором и позволяет точно определять потенциал эквипотенциальной линии.

Для определения потенциала движка, а следовательно, и потенциала эквипотенциальной линии потенциометр снабжен шкалой.

Вычисление напряженности и потенциала поля

Определение потенциала эквипотенциальной линии

Поскольку при моделировании электростатических полей квазистационарным полем тока вопрос о полярности электродов А и В является условным, будем полагать, что левый электрод А имеет отрицательный потенциал, а правый В – положительный (рис. 4).

Найдем потенциал φ_i для i -й эквипотенциальной линии. Положим потенциал отрицательного электрода равным $-0,5 U$, а потенциал положительного $+0,5 U$ (U – напряжение, подаваемое на электроды А и В потенциометра R).

Разность потенциалов между i -й линией и электродом А имеет вид φ_{i+1}

$$\varphi_i - \varphi_A = \varphi_C - \varphi_A = I R_{AC},$$

а между электродами А и В

$$\varphi_B - \varphi_A = I R_{AB} = U.$$

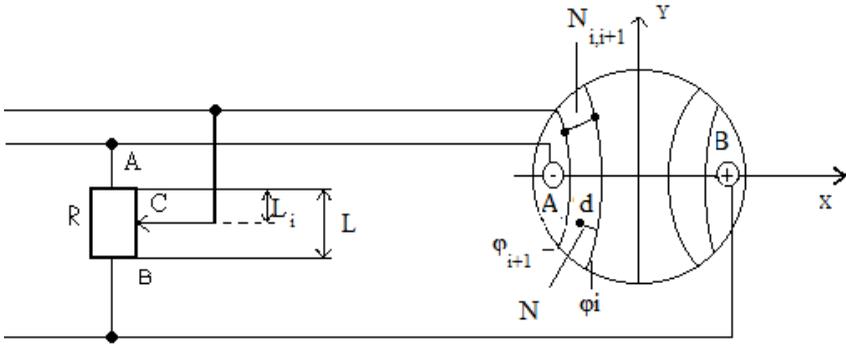


Рис. 4

Отсюда

$$\frac{\varphi_i - \varphi_A}{U} = \frac{R_{AC}}{R_{AB}}. \quad (11)$$

С другой стороны, сопротивление проводника пропорционально его длине, т.е. $R = \rho \frac{l}{S}$. С учетом этого выражения соотношение (11) можно записать в виде

$$\frac{R_{AC}}{R_{AB}} = \frac{l_i}{L} = k_i. \quad (12)$$

Здесь l_i и L – длины участков AC и AB в условных единицах соответственно. Учитывая (11), (12) и $\varphi_A = -0,5 U$, получим

$$\varphi_i = U (k_i - 0,5). \quad (13)$$

Для данной установки равно $U = 12$ В.

Определение напряженности электростатического поля

Чтобы найти напряженность поля в точке N между i -й и $i+1$ -й эквипотенциальными линиями, воспользуемся формулой

$$E = - \frac{\varphi_i - \varphi_{i+1}}{N_{i,i+1}}, \quad (14)$$

где E – среднее значение напряженности между i -й и $i+1$ -й линиями в точке N (рис. 4); $U_{i+1,i} = \varphi_i - \varphi_{i+1}$ – разность потенциалов между

i -й и $i+1$ -й эквипотенциальными линиями; $N_{i,i+1}$ – кратчайшее расстояние между этими линиями.

Используя формулу (13), можно получить выражение разности потенциалов

$$U_{i+1,i} = \pm U(k_i - k_{i+1}), \quad (15)$$

которое нужно поставить в (14). А значение $N_{i,i+1}$ измеряется на чертеже линейкой с учетом выбранного масштаба.

Определение потенциала данной точки

Потенциал φ точки d поля, расположенной между i -й и $i+1$ -й эквипотенциальными линиями, находят из равенства

$$E = \frac{\varphi_d - \varphi_i}{N}, \quad (16)$$

Откуда

$$\varphi_d = \varphi_i - E \cdot N.$$

Здесь E определяется по формуле (14); N – отрезок нормали, опущенной из точки d на i -ю линию, измеренный линейкой с учетом выбранного масштаба.

Ход работы

1. Собрать схему согласно рис. 3, ванну заполнить электролитом (водопроводная вода).

2. На листе миллиметровой бумаги выбрать масштаб и заготовить сетки для каждой пары электродов А и В в соответствующем масштабе. Условно знак минус «-» присваивают электроду, подключенному к клемме со стороны начала шкалы потенциометра, т.е. к точке А (рис. 3).

3. Установить движок потенциометра R на 1-е деление.

4. Перемещать зондовый электрод С (см. рис.3) в ванне до тех пор, пока вертикальная линия на экране осциллографа не сожмется в точку (генератор развертки осциллографа должен быть отключен). На заготовленную координатную сетку нанести координаты положения зонда С. Отсутствие напряжения на входе осциллографа означает, как отмечалось выше, что потенциал зонда С, а значит, и точки, в которой он находился, равен потенциалу движка потенциометра R.

5. Не меняя положения движка потенциометра R, найти еще 9-10 точек с таким же потенциалом ϕ . Соединить найденные точки линией, это и будет эквипотенциальная линия. Зонд С должен только касаться поверхности воды и располагаться строго вертикально.

6. Последовательно перемещая движок потенциометра R на следующее деление, согласно пп. 4, 5, построить на координатной сетке все остальные эквипотенциальные линии. Таким образом, на координатной сетке будет получено изображение электростатического поля, образованного электродами А и В в плоскости поверхности электролита, и, следовательно, найдено распределение потенциала $\phi = \phi(x, y)$.

7. Нанести у каждой линии значение потенциала, вычисленное по формуле (13).

8. Меняя электроды А и В другими, смоделировать электрическое поле электродов.

9. Определить потенциал и напряженность поля в 4-5 произвольно выбранных или заданных преподавателем точках для одного из смоделированных полей. В соответствии с выбранным масштабом и вычисленными значениями напряженности начертить в выбранных точках вектора \vec{E} .

Полученные результаты занести в таблицу. Над таблицей следует указать, для какого поля проводились измерения.

Примечание. При определении длин нормалей N_{i+1} и N необходимо учитывать масштаб изображения.

Таблица

№ п/п	k_i	$\phi, В$	$U_{i+1, i}, В$	$N_{, i, i+1}, м$	$E, В/м$	$N, м$	$\phi, В$
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Что в себя включает понятие электростатического поля?
3. Графически изобразите электростатическое поле в случае одиночного заряда, одной заряженной плоскости.
4. Каким методом изучается электростатическое поле в данной работе?

Вопросы для защиты работы

1. Дайте определение электростатического поля.
2. Назовите основные характеристики электростатического поля и их единицы измерения.
3. Что называется силовой линией электростатического поля?
4. Дайте определение напряженности E и потенциала φ электростатического поля.
5. Приведите примеры расчета E и φ для точечного заряда.
6. Что называется разностью потенциалов? Приведите примеры расчета разности потенциалов между двумя заряженными пластинами.
7. Найдите связь между E и φ .
8. Дайте анализ результатов исследований электростатического поля.
9. Каковы Ваши критические замечания по данной работе?
10. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора \vec{E} .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 40

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы - определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник постоянного тока, ключ, переключатель полярности.

Тангенс-гальванометр. Поле катушки

Из курса физики известно, что Земля представляет собой огромный магнит, полюса которого расположены вблизи географических полюсов: вблизи северного географического полюса расположен южный магнитный полюс S, а вблизи южного – северный магнитный полюс N (рис. 1).

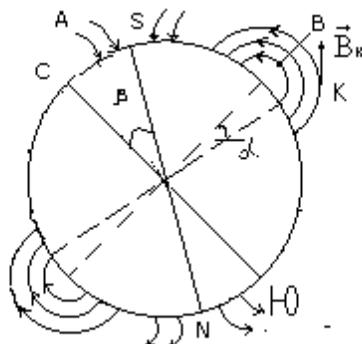


Рис. 1

Магнитное поле Земли на экваторе направлено горизонтально (точка B), а у магнитных полюсов – вертикально (точка A). В остальных точках земной поверхности магнитное поле Земли направлено под некоторым углом (точка K).

Величину проекции напряженности земного магнитного поля H на **горизонтальную** плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_3 . Направление этой составляющей принимается за направление **магнитного меридиана**, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется **плоскостью магнитного меридиана**.

Угол α между направлением магнитного поля Земли и горизонтальной плоскостью называется углом наклоения, а угол β между географическим и магнитным меридианом – **углом склонения**.

Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь вокруг вертикальной оси, будет отклоняться в горизонтальной плоскости только под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (H_3).

Это свойство магнитной стрелки используется в тангенс-гальванометре для определения H_3 .

Тангенс-гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиусом R с некоторым числом витков n . Величина радиуса катушки и число витков указаны на тангенс-гальванометре. В центре катушки в горизонтальной плоскости расположен компас. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану Земли NS . Поворотом катушки около вертикальной оси нужно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана.

Если после такой установки катушки по ней пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол α . Объясняется это тем, что на магнитную стрелку будут действовать два магнитных поля: 1-е – горизонтальная составляющая магнитного поля Земли H_3 и 2-е – созданное током катушки H_1 . Под действием этих полей магнитная стрелка займет такое положение равновесия, при котором равнодействующая двух полей будет совпадать с линией, соединяющей полюса стрелки. На рис. 2 NS – направление магнитного меридиана Земли; A и B – сечение витка катушки горизонтальной плоскостью; N_1S_1 – магнитная стрелка компаса, помещенная в центре катушки.

Характеристиками магнитного поля являются вектор магнитной индукции \vec{B} и вектор напряженности \vec{H} магнитного поля.

$$\text{Единицы измерения } B = [\text{Тл}] \text{ (Тл – тесла); } H = \left[\frac{\text{А}}{\text{М}} \right].$$

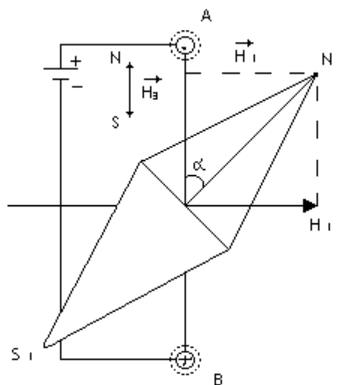


Рис. 2

Индукция B и напряженность H связаны соотношением (материальное уравнение)

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$ – магнитная постоянная; μ – относительная

магнитная проницаемость вещества, для воздуха $\mu = 1$; \vec{H}_3 – вектор горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли; \vec{H}_1 – вектор напряженности магнитного поля, созданного током в катушке (направление \vec{H}_1 определяется по правилу буравчика).

Обратите внимание на расположение магнитных силовых линий вокруг проводника с током: в точке А ток идет на нас (показан точкой), в точке В ток идет от нас (показан крестиком).

Магнитное поле тока катушки (вектор \vec{H}_1) направлено перпендикулярно к плоскости витков.

Из рис. 2 видно, что $tg \alpha = \frac{H_1}{H_3}$, следовательно,

$$H_3 = \frac{H_1}{tg \alpha}. \quad (2)$$

Величину напряженности поля H_1 можно определить, используя закон Био-Савара-Лапласа, который формулируется следующим образом: элементарная индукция (dB) магнитного поля, создаваемого элементом тока (Idl), прямо пропорциональна величине элемента тока Idl , синусу угла между вектором элемента тока и радиус-вектором и обратно пропорциональна квадрату расстояния от элемента тока до точки, где рассматривается индукция поля. Математически закон Био-Савара – Лапласа записывается так:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}.$$

Элементом тока Idl называется векторная физическая величина, равная произведению силы тока I на элемент длины dl проводника (бесконечно малая длина проводника).

На рис. 3 показан элемент тока Idl . В точке А вектор индукции $d\vec{B}$ магнитного поля, создаваемого элементом тока, направлен перпендикулярно плоскости чертежа от нас и обозначен крестом.

Используя закон Био-Савара-Лапласа, найдем индукцию B магнитного поля, создаваемого одним круговым током. Для этого круговой проводник с током разбиваем на большое число элементов тока Idl (рис. 4). Найдем индукцию магнитного поля, создаваемого элементом тока в точке C , равноудаленной от кругового тока (см. рис. 4):

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}. \quad \alpha \quad (3)$$

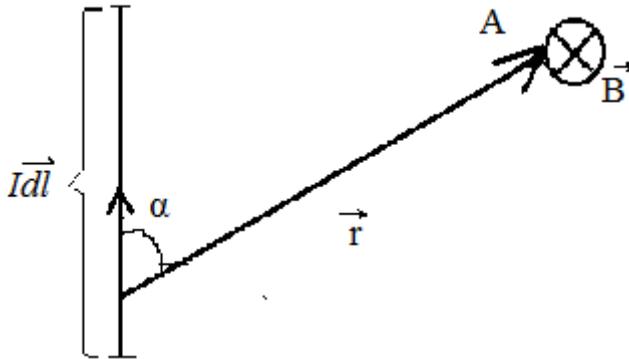


Рис. 3

Угол α между направлением тока и радиус-вектором составляет $\frac{\pi}{2}$. Поэтому $\sin \frac{\pi}{2} = 1$. Из сложения векторов имеем

$$d\vec{B} = d\vec{B}_x + d\vec{B}_y. \quad (4)$$

Проинтегрировав (4), получим результирующую индукцию, т.е.

$$\vec{B} = \int d\vec{B}_x + \int d\vec{B}_y.$$

Так как составляющие вектора $d\vec{B}_x$ направлены противоположно и сумма векторов $d\vec{B}_x$ равна нулю, то $\int d\vec{B}_x = 0$. Тогда

$$B = \int dB_y. \quad (5)$$

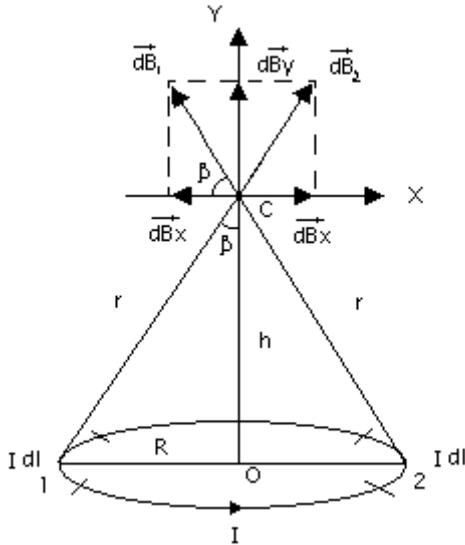


Рис. 4

По рис. 4 $dB_y = dB \sin \beta$. Так как $\sin \beta = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + h^2}}$, то с учетом (3) имеем

$$dB_y = \frac{\mu_0 I dl R}{4\pi (R^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим

$$B = \frac{\mu_0 I R}{4\pi (R^2 + h^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dI = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (7)$$

В центре 0 кругового тока ($h = 0$) индукция равна

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (9)$$

Используя (1) и учитывая, что $\mu = 1$, получим напряженность в центре кругового тока:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{2R}. \quad (10)$$

Напряженность магнитного поля H_1 в центре катушки с числом витков n равна Hn . Подставляя $H_1 = Hn$ в формулу (2) с учетом (10), получим

$$H_3 = \frac{I \cdot n}{2R \operatorname{tg} \langle \alpha \rangle}, \quad (11)$$

где I – ток, текущий в витке; R – радиус витка.

Этой формулой пользуются для определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли H_3 .

Ход работы

1. Собрать электрическую цепь из тангенс-гальванометра, реостата R , ключа K , амперметра A и источника E (рис. 5).

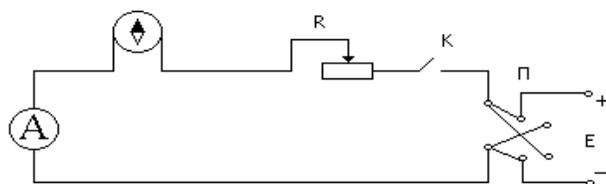


Рис. 5

2. Совместить плоскость кольца катушки с плоскостью магнитного меридиана. Для этого сначала с помощью поворотного кольца установить шкалу тангенс-гальванометра так, чтобы линия, которая мысленно проводится через два нуля шкалы, совпала с плоскостью кольца катушки. Затем поворотом самого тангенс-гальванометра установить стрелку на нуль шкалы, при этом окажутся совмещенными плоскости катушки и магнитного меридиана и линия нулей шкалы.

Примечание. Для точной установки нулей шкалы в плоскости катушки конструкцией тангенс-гальванометра предусмотрен совмещенный с нулями прицел, представляющий собой две вертикальные щели: узкую и широкую, посередине каждой из которых натянута тонкая проволока.

3. Включить постоянный ток, движком реостата установить по круговой шкале компаса угол отклонения стрелки $\alpha_1 = 45^\circ$. Величину тока измерять по амперметру, угол α_2 (рис. 6, а) – по шкале тангенс-гальванометра.

4. Поменять направление тока, поддерживая его по величине неизменным (направление тока меняют либо с помощью переключателя полярности П, либо меняя полярность источника), и продумать те же измерения для углов α_3 и α_4 (рис. 6, б).

5. Найти среднее значение:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{4} .$$

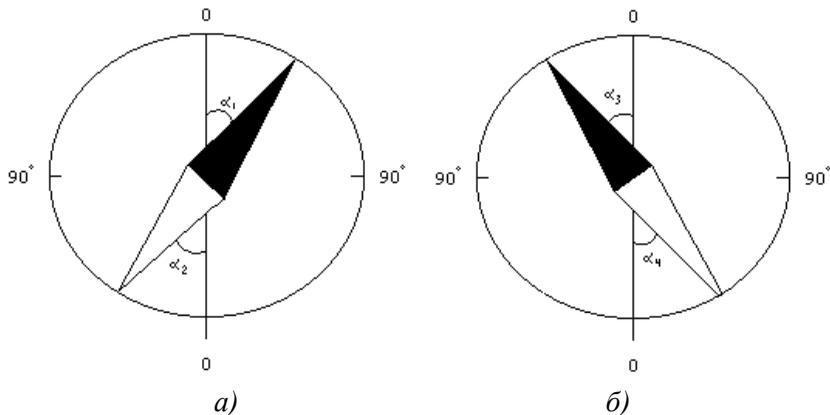


Рис. 6

6. Вычислить $\text{tg} \langle \alpha \rangle$ и по формуле (11) вычислить H_3 .

Все измеренные значения и результаты вычислений записать в таблицу.

Таблица

№ п/п	α , град.	$\langle \alpha \rangle$, град.	$\text{tg} \langle \alpha \rangle$	I, А	R, м	n	H, А/м	ΔH , А/м	$\Delta H/H$

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Дайте понятие магнитного поля Земли.

3. Опишите метод определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_z с помощью тангенс-гальванометра.

4. Почему измерения выгоднее проводить при угле отклонения магнитной стрелки $\alpha = 45^0$?

Вопросы для защиты работы

1. Дайте понятие магнитного поля.
2. Дайте характеристики магнитного поля. Каковы их единицы измерения в системе СИ?
3. Сформулируйте и запишите закон Био- Савара – Лапласа.
4. Выведите формулу напряженности в центре кругового тока и рабочую формулу.
5. Выведите формулу напряженности магнитного поля, создаваемого прямым током (конечной длины и бесконечной длины).
6. Дайте определение силовой линии магнитного поля.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 41

ИЗУЧЕНИЕ СТАБИЛИТРОНА И СНЯТИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

Цель работы - изучение работы стабилизатора и снятие его характеристик.

Приборы и принадлежности: стабилизатор, источник питания, реостат, балластное сопротивление, сопротивление нагрузки, вольтметры, соединительные провода.

Прохождение электрического тока через газы называется газовым разрядом. Газы в нормальном состоянии являются изоляторами, носители тока в них отсутствуют. Лишь при создании особых условий в газах появляются носители тока (ионы, электроны) и возникает электрический разряд. Газ становится проводником электрического тока, когда некоторая часть его молекул ионизируется, т.е. происходит расщепление молекул на ионы и электроны. Для этого газ нужно подвергнуть действию какого-либо ионизатора: сильному нагреву (столкновение быстрых молекул становится настолько сильным, что они разбиваются на ионы), коротковолновым электромагнитным излучениям (ультрафиолетовые, рентгеновские, γ – излучение), корпускулярному излучению (потоки

электронов, протонов, α – частиц) и т.д. При такой ионизации газов происходит вырывание из некоторых молекул одного или нескольких электронов, в результате чего эти молекулы становятся положительно заряженными ионами (процессы 1, 3, рис. 1). При некоторых условиях электроны могут захватываться нейтральными молекулами, которые таким образом становятся отрицательными ионами (процесс 2). Одновременно с процессом ионизации газа всегда протекает и обратный процесс –рекомбинации: при встрече положительных и отрицательных ионов или положительных ионов и электронов происходит образование нейтральных молекул или атомов (процесс 4).

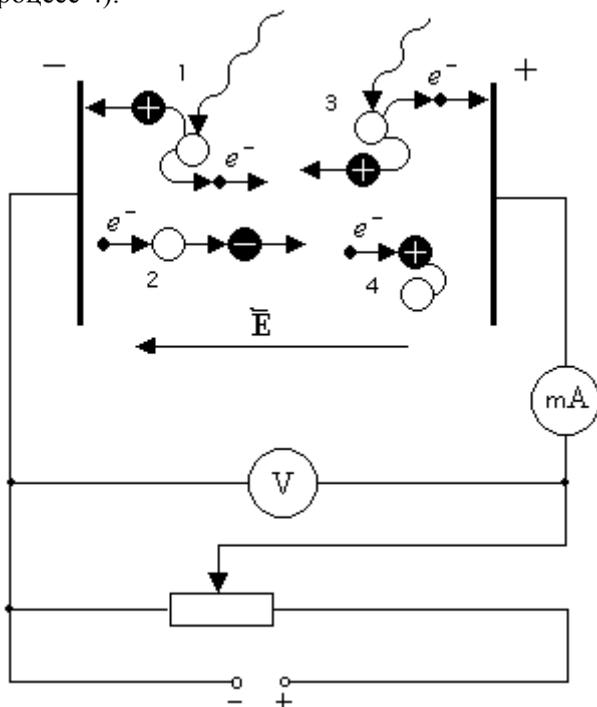


Рис. 1

Рассмотрим цепь, содержащую газовый промежуток (рис. 1), непрерывно подвергающийся действию какого-либо ионизатора (космических лучей, следов радиоактивного излучения веществ земной коры и пр.). В результате такого воздействия в цепи потечет электрический ток, созданный положительными ионами, движущимися в направлении электрического поля, и отрицатель-

ными ионами и электронами, движущимися против направления поля.

Зависимость этого тока от приложенного к электродам напряжения представлена на рис. 2. На участке ОА сила тока подчиняется закону Ома, т.е. растет пропорционально напряжению. При дальнейшем увеличении ($U > U_A$) напряжения выполнение закона Ома нарушается – рост силы тока замедляется (участок АВ), а затем прекращается совсем (участок ВС). Это объясняется тем, что все носители заряда, создаваемые внешним ионизатором за некоторое время, за то же время успевают достичь электродов. В результате имеем ток насыщения. Если на любом участке кривой ОАВС прекратить действие ионизатора, то прекратится и газовый разряд. Разряды, существующие только под действием внешних ионизаторов, называются *несамостоятельными*.

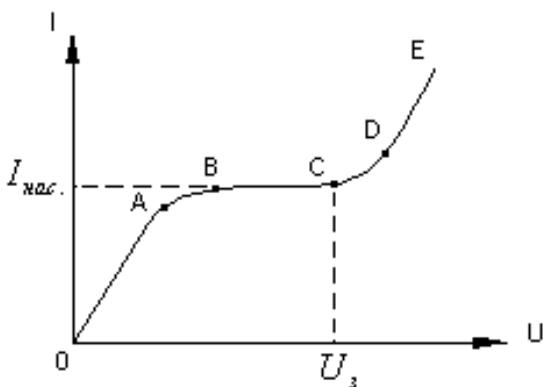


Рис. 2

Разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора, называется *самостоятельным*. При больших напряжениях: $U > U_s$ (рис. 2) – ток в газовом промежутке сильно возрастает (участки CD и DE). Это объясняется тем, что электроны, сильно ускоренные электрическим полем, сталкиваясь с нейтральными молекулами, ионизируют их, в результате чего возникают вторичные электроны (процесс 1 на рис. 3).

Положительные ионы движутся к катоду, а электроны – к аноду. Вторичные электроны вновь ионизируют молекулы газа, и, следовательно, общее количество электронов и ионов будет лавинооб-

разно возрастать по мере продвижения электронов к аноду. Это является причиной увеличения электрического тока на участке CD (см. рис. 2). Описанный процесс называется ударной ионизацией.

Однако ударная ионизация под действием электронов недостаточна для поддержания разряда при удалении внешнего ионизатора. Для этого необходимо, чтобы электронные лавины «воспроизводились», т.е. чтобы в газе под действием каких-то процессов возникали новые электроны. Такие процессы схематически показаны на рис. 3: 1) ускоренные полем положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны (процесс 2); 2) положительные ионы, сталкиваясь с молекулами газа, приводят их в возбужденное состояние; переход таких молекул в нормальное состояние сопровождается испусканием фотона (процесс 3); 3) фотон, поглощенный нейтральной молекулой, ионизирует ее, происходит так называемый процесс фотонной ионизации молекул (процесс 4); 4) под действием фотонов происходит выбивание электронов из катода (процесс 5).

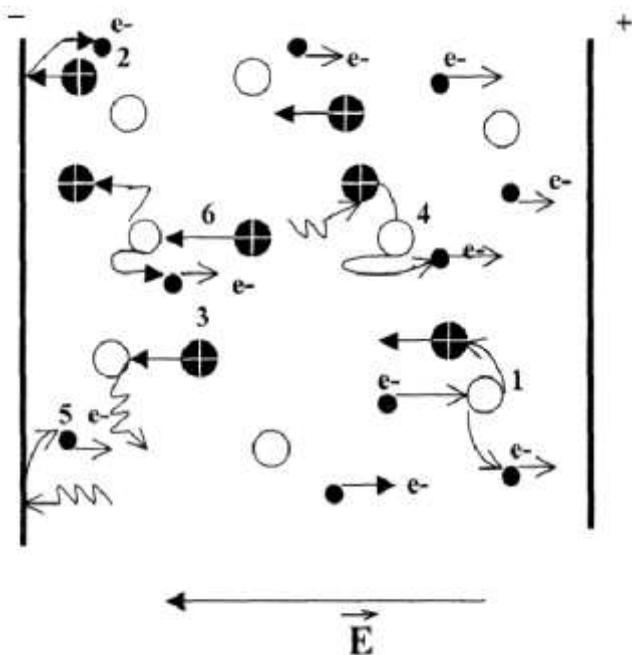


Рис. 3

Наконец, при значительных напряжениях между электродами газового промежутка наступает момент, когда положительные ионы, обладающие меньшей длиной свободного пробега, чем электроны, приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа (процесс б), и к отрицательной пластине устремляются ионные лавины. Когда кроме электронных лавин возникают еще и ионные, сила тока растет практически без увеличения напряжения (участок DE на рис. 2).

В результате описанных процессов (1–6) число ионов и электронов в объеме газа лавинообразно возрастает и разряд становится самостоятельным, т.е. сохраняется после прекращения действия внешнего ионизатора. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, называется напряжением пробоя, или напряжением зажигания U_3 (рис. 2) [4].

В зависимости от давления газа, конфигурации электродов, параметров внешней цепи можно говорить о четырех типах самостоятельного разряда: тлеющем, искровом, дуговом и коронном.

Тлеющий разряд возникает при низких давлениях. Если к электродам, впаянным в стеклянную трубку длиной 30–50 см, приложить постоянное напряжение в несколько сотен вольт, постепенно откачивая из трубки воздух, то при давлении $\approx 5,3 \div 6,7$ кПа возникает разряд в виде светящегося извилистого шнура красноватого цвета, идущего от катода к аноду.

Тлеющий разряд широко используется в технике. Так как свечение положительного столба имеет характерный для каждого газа цвет, то его используют в газосветных трубках для светящихся надписей и реклам. В лампах дневного света, более экономичных, чем лампы накаливания, излучение тлеющего разряда, происходящее в парах ртути, поглощается нанесенным на внутреннюю поверхность трубки флуоресцирующим веществом (люминофором), начинающим под воздействием поглощенного излучения светиться. Спектр свечения, при соответствующем подборе люминофоров, близок к спектру солнечного излучения.

Коронный разряд наблюдается при нормальном давлении в газе, находящемся в сильно неоднородном электрическом поле (около острий, проводов линий высокого напряжения и т.д.). Ионизация газа электронным ударом и его свечение, напоминающее корону, происходят только в небольшой области, прилегающей к электроду (коронирующий электрод). Светящийся слой

называется коронирующим слоем. Если коронирует катод, то электроны, которые вызывают ионизацию в объеме коронирующего слоя, выбиваются из катода положительными ионами. Если коронирует анод, то электроны возникают вблизи анода благодаря ионизации газа под действием излучения коронирующего слоя. При повышенном напряжении коронный разряд на острие имеет вид светящейся кисти – тонких светящихся линий, которые выходят из острия, имеют изгибы и изломы, изменяющиеся с течением времени (кистевой разряд).

Искровой разряд, наблюдающийся при нормальном давлении и большой напряженности поля между электронами, имеет вид прерывистых ярких зигзагообразных нитей – каналов ионизованного газа. Нити пронизывают пространство между электродами и исчезают, сменяясь новыми. При этом наблюдается яркое свечение газа и выделяется большое количество теплоты. В искровых каналах, где создаются высокое давление и весьма высокие температуры, возникают электронные и ионные лавины, которыми определяются все свойства искрового разряда. Его примером является молния. Главный канал молнии имеет диаметр от 10 до 25 см. Длина молнии достигает нескольких километров, и в ней развивается сила тока в импульсе до сотен тысяч ампер.

Дуговой разряд является формой разряда при большой плотности тока и сравнительно небольшом напряжении между электродами, порядка нескольких десятков вольт. Основной причиной дугового разряда является интенсивная термоэлектронная эмиссия раскаленного катода. Электроны ускоряются электрическим полем и производят ударную ионизацию молекул газа, уменьшается электрическое сопротивление газового промежутка, а его проводимость сильно возрастает. Между электродами возникает столб ярко светящегося газа (электрическая дуга). При атмосферном давлении температура катода достигает 3000 °С, бомбардировка анода электронами создает в нем углубление-кратер дуги с температурой около 4000 °С. Температура газа в канале электрической дуги 5000-60000 °С. Дуговой разряд, как мощный источник света, используется в прожекторах, проекционной и киноаппаратуре.

Газовые стабилитроны

Стабилитроны – приборы нормального тлеющего разряда, предназначенные для получения неизменных напряжений постоян-

ного тока. Они широко применяются в устройствах автоматики. Конструкция стабилитрона, его внешний вид, и схемное изображение показаны на рис. 5.

Стабилитрон представляет собой стеклянный баллон, который заполнен под небольшим давлением смесью газов неона, аргона и гелия. Внутри баллона помещается катод цилиндрической формы, изготовленный из никеля или стали. Анод стабилитрона выполнен в виде стержня и помещается в центре катода. Внутренняя поверхность катода покрыта активным слоем. Электроды соединяются с ножками цоколя лампы.

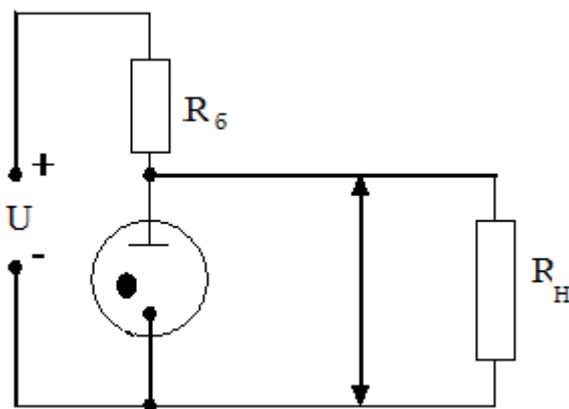


Рис. 4

Схема включения стабилитрона представлена на рис. 4. В этой схеме $R_н$ – сопротивление нагрузки, $R_б$ – балластное сопротивление, ограничивающее ток стабилитрона.

Если балластное сопротивление слишком мало, то через стабилитроны идет чрезмерно большой ток и стабилитрон выходит из строя.

Пусть напряжение питания схемы увеличивается, тогда и напряжение между электродами стабилитрона немного возрастает, и, следовательно, увеличиваются скорости положительных ионов, падающих на катод. При этом число вторичных электронов, выбиваемых из катода положительными ионами, станет больше, общее количество носителей в газовом промежутке возрастет и сопротивление этого промежутка постоянному току уменьшится.

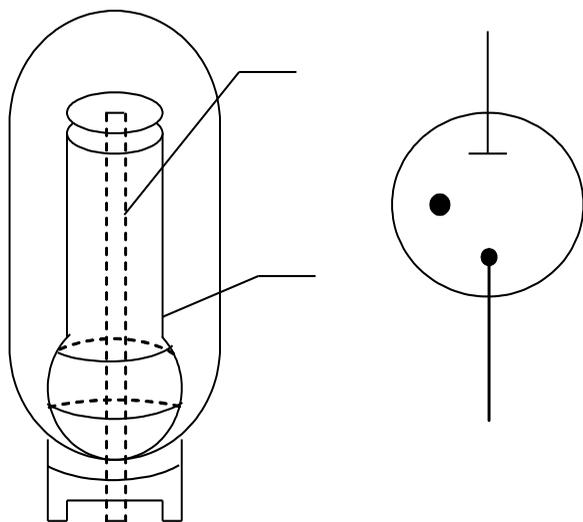


Рис. 5

В результате напряжение на нагрузке, включенной параллельно электродам стабилизатора, останется почти постоянным.

Напряжение питания выбирают обычно в 1,5 раза больше напряжения на нагрузке. Если сопротивление нагрузки равно бесконечности, т.е. если нагрузка не присоединена, то весь ток идет через стабилизатор. При уменьшении сопротивления нагрузки ток нагрузки увеличивается и уменьшается ток стабилизатора. В большинстве случаев, когда ток стабилизатора меньше 5 мА, стабилизация напряжения резко ухудшается. Нельзя допускать, чтобы ток стабилизатора превышал максимально допустимое значение 30 мА, иначе нормальный разряд перейдет в аномальный и напряжение на электродах не будет постоянным.

Стабилизатор вследствие инерциальности ионов сглаживает быстрые изменения питающего напряжения. При увеличении тока в стабилизаторе площадь светящегося пятна возрастает. Ионы не могут мгновенно расплзтись на поверхности электродов при увеличении тока или мгновенно собраться на небольшой площади при его уменьшении. На эти процессы затрачивается определенное время. Стабилизатор при правильной эксплуатации поддерживает постоянным напряжение на электродах. При этом погрешность составляет 1-1,5%. Указанную погрешность вызывают следующие причины: изменение напряжения питания, старение, изменение

температуры и собственные шумы стабилитрона. Промышленность выпускает стабилитроны на различные напряжения: 75, 100, 150 В. Для большинства стабилитронов ток нагрузки составляет от 5 до 30 мА, внутреннее сопротивление – 30-150 Ом.

Выпускаются также точные стабилитроны, погрешность которых не превышает 0,1%.

Ход работы

1. Собрать схему согласно рис. 6.

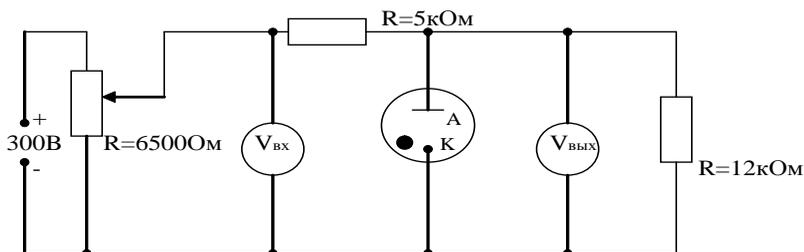


Рис. 6

2. Медленно перемещая движок реостата от начала шкалы, тем самым увеличивая входное напряжение от нуля до напряжения U_3 , при котором происходит зажигание стабилитрона, зафиксировать напряжение U_3 .

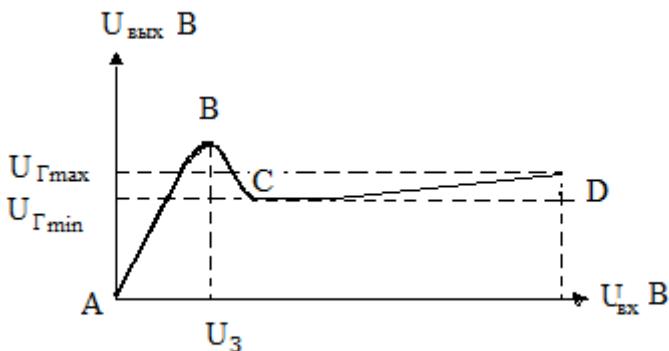


Рис. 7

3. Произвести измерения. Для этого, изменяя напряжение на входе от 0 до 300 В, через каждые 20 В измерить напряжение на выходе. При этом вблизи напряжения зажигания U_3 за 20 В до него и после него произвести измерения через каждые 4 В для того, чтобы определить максимум кривой зависимости $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{вх}}$. Результаты измерений занести в таблицу.

4. Построить график зависимости $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{вх}}$.

Таблица

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	

5. По снятой зависимости $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ определить напряжение зажигания U_3 и максимальное и минимальное значения напряжения горения ($U_{\Gamma_{\text{max}}}$, $U_{\Gamma_{\text{min}}}$). Разность $U_{\Gamma_{\text{max}}} - U_{\Gamma_{\text{min}}}$ должна находиться в пределах (12-15) В.

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Объясните устройство, принцип действия и применение стабилизатора.
3. Какова роль балластного сопротивления?
4. Выберите масштаб для построения графика.

Вопросы для защиты работы

1. Что представляет собой электрический ток в газах?
2. Охарактеризуйте процессы ионизации и рекомбинации.
3. В чем отличие несамостоятельного газового разряда от самостоятельного?
4. Каковы условия существования несамостоятельного и самостоятельного газового разряда?
5. При каких условиях самостоятельный газовый разряд переходит в самостоятельный?
6. Почему газовый разряд не подчиняется закону Ома?
7. Охарактеризуйте типы самостоятельного разряда.

8. Проанализируйте построенный Вами график зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42

ИЗУЧЕНИЕ ВАКУУМНОГО ДИОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы - исследование вольт-амперной характеристики вакуумного диода; определение удельного заряда электрона на основании уравнения Богуславского-Лэнгмюра.

Приборы и принадлежности: вакуумный диод, источник тока, миллиамперметр, вольтметр, реостат, соединительные провода.

Электрический ток в вакууме

Из курса физики известно, что электрический ток в вакууме не подчиняется закону Ома. В настоящей работе на основе снятой вольт-амперной характеристики вакуумного диода определяется удельный заряд электрона.

В вакуумной электронной лампе электрическое поле, действующее на каждый электрон, складывается из внешнего поля, создаваемого разностью потенциалов между электродами, и поля, создаваемого всеми остальными электронами, образующими пространственный заряд, благодаря которому при малых анодных напряжениях анодный ток может быть значительно меньше возможного тока эмиссии катода и будет постепенно увеличиваться при повышении анодного напряжения.

При теоретическом рассмотрении вопроса о зависимости анодного тока от величины анодного напряжения в вакуумном диоде следует учитывать ряд допущений:

1) начальные скорости электронов, эмитируемых катодом, настолько малы, что можно считать их равными нулю (так как энергии электронов, покидающих катод, не превышают нескольких десятых электроновольта, при анодных напряжениях в десятки вольт это допущение вполне оправданно);

2) анодный ток далек от насыщения;

3) пространственный заряд создает такое распределение потенциалов между катодом и анодом, что непосредственно у поверхности катода напряженность электрического поля равна нулю.

Расчет показывает, что анодный ток пропорционален анодному напряжению в степени три вторых:

$$I_a = \alpha \cdot U^{3/2}, \quad (1)$$

где α – коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, заряда и массы электрона.

В случае коаксиальных цилиндрических электродов выражение (1), называемое *законом трех вторых*, или уравнением Богуславского – Лэнгмюра, имеет вид

$$I_a = 4\pi\epsilon_0 \frac{2\sqrt{2}}{9} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{l \cdot U^{3/2}}{r \cdot \beta^2}, \quad (2)$$

где $\frac{e}{m}$ – удельный заряд электрона; ϵ_0 – электрическая постоянная; r – радиус анода; l – длина катода; β – коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода (при отношении радиусов больше 10 близок к единице).

Так как в настоящей работе по вольт-амперной характеристике диода определяется удельный заряд электрона, удобно строить графическую зависимость анодного тока от анодного напряжения в степени три вторых, поскольку при выбранных осях I_a и $U^{3/2}$ указанная зависимость, согласно (1), должна быть линейной. Угловой коэффициент, равный тангенсу угла наклона полученной прямой, определяется по формуле

$$K = \frac{I}{U^{3/2}}. \quad (3)$$

Таким образом, с учетом (2) и (3) угловой коэффициент равен

$$K = 4\pi\epsilon_0 \frac{2\sqrt{2}}{9} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{l}{r\beta^2}. \quad (4)$$

Отсюда можно рассчитать удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{9r\beta^2 K}{2\sqrt{2} \cdot l} \right)^2. \quad (5)$$

Наиболее существенные факторы, приводящие к отклонениям от закона трех вторых, следующие:

1. Неравенство нулю начальных скоростей электронов, эмитируемых катодом. За счет этого изменяется характер распределения потенциала между электродами; в частности, напряженность электрического поля у поверхности катода также не равняется нулю.

2. Контактная разность потенциалов между катодом и анодом. В уравнениях (1) и (2) под напряжением подразумевается истинная величина разности потенциалов, заметная при анодных напряжениях.

3. Неэквипотенциальность катода (в случае катодов прямого канала). В этом случае разность потенциалов между анодом и различными участками катода оказывается разной. Этот фактор также является существенным при малых анодных напряжениях.

4. Асимметрия системы электродов (например, неконцентричность катода и анода).

5. Наличие остатков газа в лампе. При достаточно высоких анодных напряжениях происходит ионизация газа. Положительные ионы нейтрализуют действие отрицательного пространственного заряда, и анодный ток возрастет значительно быстрее, чем следует из закона трех вторых.

Перечисленные выше факторы приводят к заметным отклонениям от закона трех вторых при определении удельного заряда по формуле (4). Существенно и то обстоятельство, что величина удельного заряда электрона входит в выражение закона трех вторых (2) под знаком квадратного корня, поэтому при расчете удельного заряда электрона по формуле (4) погрешность соответственно увеличивается.

В настоящей работе используется лампа с подогревным оксидным катодом. Оксидный катод отличается той особенностью, что у него не наблюдается резко выраженного, как у катода чистых металлов, насыщения анодного тока, что вызвано сильным влиянием внешнего электрического поля на величину тока эмиссии оксидного катода. Поэтому при значительных внешних полях и дальнейшем увеличении напряжения анодный ток продолжает возрастать.

Описание установки

Схема установки для проведения измерений представлена на рис. 1. В работе используется радиолампа 2Ц2С (диод). Анодное напряжение подается от универсального источника питания. Напряжение регулируется потенциометром и измеряется вольтметром. Анодный ток лампы измеряется миллиамперметром. Напряжение накала подается также от универсального источника питания.

Данные вакуумного диода типа 2Ц2С: длина катода $l = 0,9$ см, радиус анода $r = 0,95$ см, отношение радиуса анода и длины катода приблизительно равно 10, так что $\beta = 0,932$.

Ход работы

1. Собрать схему согласно рис. 1.

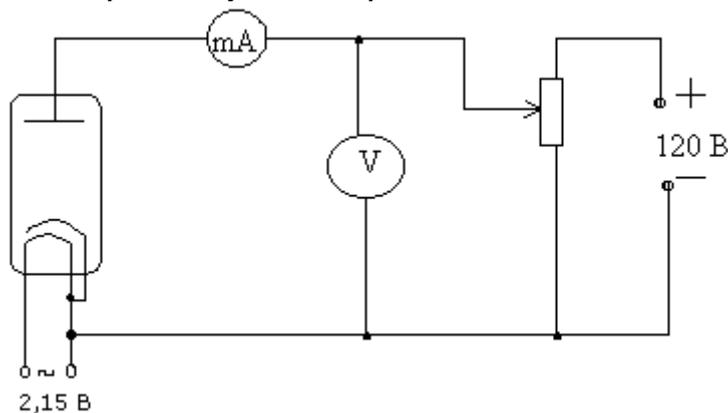


Рис. 1

2. Снять зависимость анодного тока от анодного напряжения, изменяя анодное напряжение от 0 В до 120 В через 10 В. Данные измерений и вычисленных значений $U^{3/2}$ занести в таблицу.

Таблица

$U_a, \text{В}$	
I_a, mA	
$U_a^{3/2}, \text{В}^{3/2}$	

3. Построить графическую зависимость I_a от $U_a^{3/2}$.

4. Определить угловой коэффициент полученной прямой согласно (3) и рассчитать по формуле (5) $\frac{e}{m}$. Теоретическое значение

удельного заряда равно $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Опишите устройство и принцип действия вакуумного диода.
3. Опишите метод измерения удельного заряда электрона.
4. Оцените погрешность метода измерения удельного заряда электрона.

Вопросы для защиты работы

1. Что называется термоэлектронной эмиссией?
2. Каким законам подчиняется ток в вакууме?
3. Объясните отклонение силы тока от закона Ома в вакуумном диоде.
4. Дайте анализ результатов вычислений и измерений.
5. Каковы Ваши критические замечания и суждения по данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 43

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы - изучение работы различных схем выпрямления переменного тока.

Приборы и принадлежности: полупроводниковые диоды, соединительные провода, лабораторный трансформатор, электронный осциллограф.

Изучение работы схем выпрямителей. Выпрямление переменного тока

Основное применение полупроводниковые диоды находят при построении различных выпрямителей - устройств, предназначенных для преобразования переменного тока в постоянный.

Известны несколько различных схем выпрямителей переменного тока, рассмотрим их работу.

Однополупериодная однофазная схема выпрямления

Выпрямленный ток фактически не является постоянным, он пульсирующий. На рис. 1, где показана однополупериодная однофазная схема выпрямления, видно, что через диод *Д* проходит лишь прямая полуволна тока, обратная же практически не проходит.

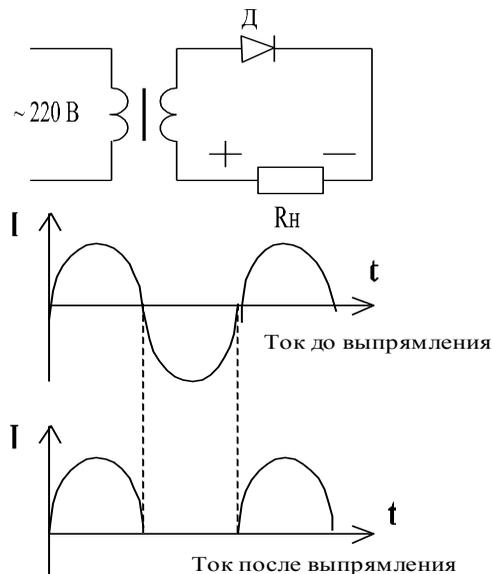


Рис. 1

Двухполупериодная однофазная схема выпрямителя

В двухполупериодном выпрямителе (схема на рис. 2) используются обе полуволны.

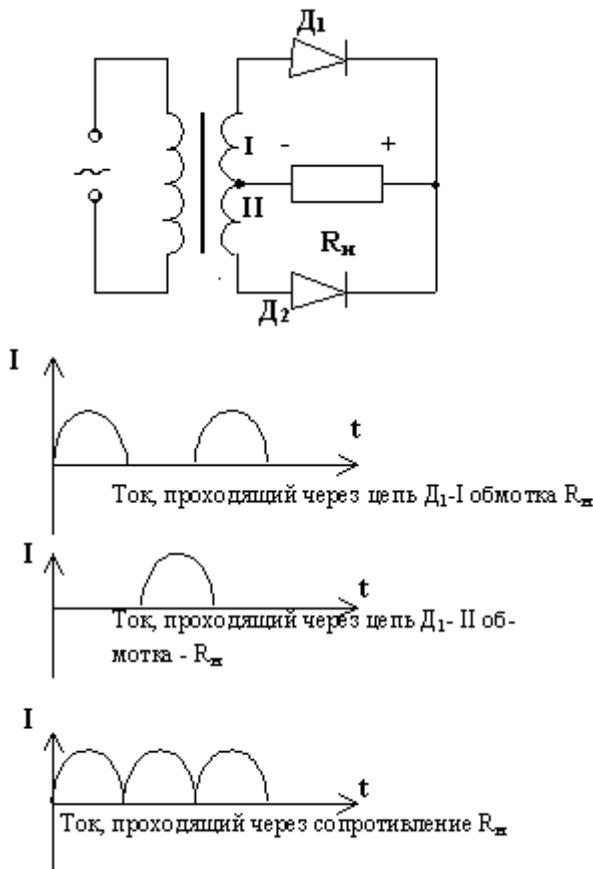


Рис. 2

В первую половину периода полуволна переменного тока проходит через обмотку I трансформатора, диод D₁ и резистор R_н. Второй диод в это время закрыт, т.к. включен навстречу первому. Во вторую половину периода ток идет через обмотку II, диод D₂ (он открылся, так как сменилось направление тока) и сопротивление нагрузки в том же направлении, что и в первом полупериоде.

Диод D_1 в этот момент заперт. Таким образом, частота пульсаций увеличилась вдвое по сравнению с однополупериодным выпрямителем, средний выпрямленный (пульсирующий) ток стал больше, но понадобились две обмотки трансформатора.

Мостовая схема выпрямления

Мостовая схема (рис. 3) дает двухполупериодное выпрямление переменного тока. По сравнению с двухполупериодной однофазной схемой выпрямления в мостовой схеме используется одна обмотка трансформатора, но зато необходимы четыре диода.

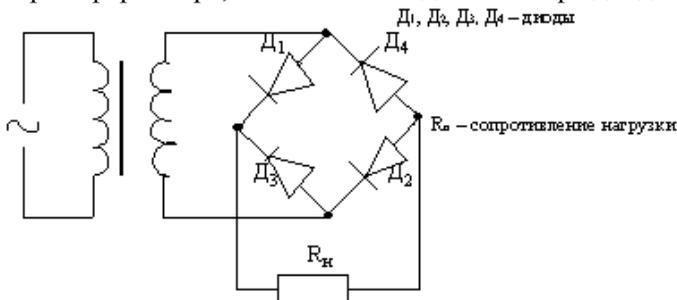


Рис. 3

Ход работы

Собрав поочередно схемы (рис. 4-7), зарисовать соответственно осциллограммы переменного напряжения в сети (рис. 4), в мостовой (рис. 7), однополупериодной (рис. 5), двухполупериодной (рис. 6) схемах выпрямления переменного напряжения.

Провести сравнительный анализ различных схем выпрямления.



Рис. 4

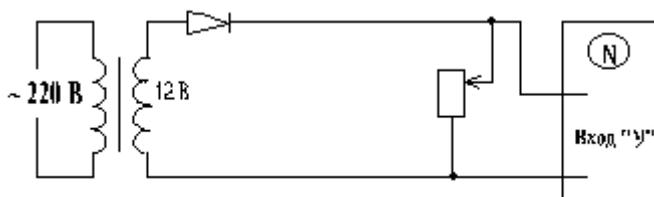


Рис. 5

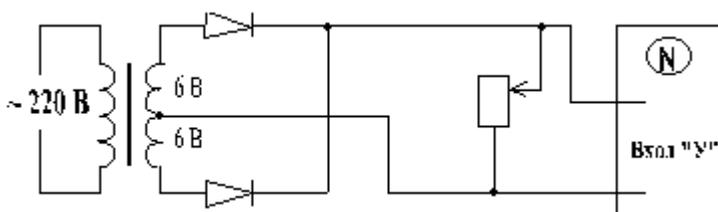


Рис. 6

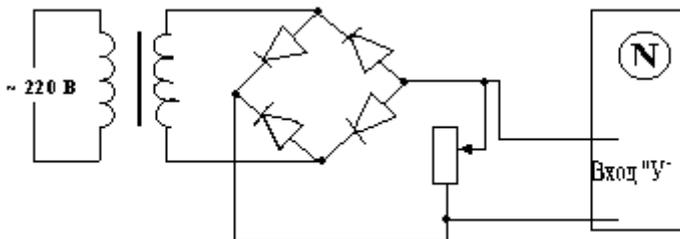


Рис. 7

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Какие существуют типы выпрямительных диодов?
3. Начертите принципиальную электрическую схему рабочей установки для изучения выпрямления переменного тока по однополупериодной, двухполупериодной и мостовой схемам.

Вопросы для защиты работы

1. Каков принцип действия полупроводникового диода?
2. Какое отличие имеет выпрямленный ток по однополупериодной схеме с помощью лампового и полупроводникового диода?
3. Каковы Ваши критические замечания к рабочей установке?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 45

СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы - снятие кривой намагничивания; снятие петли гистерезиса и определение затрат энергии на перемагничивание.

Приборы и принадлежности: электронный осциллограф, трансформатор, вольтметр, реостат, исследуемый трансформатор, конденсатор и два сопротивления, смонтированные на общей панели.

Типы магнетиков и их свойства

Магнитные свойства магнетиков характеризуются вектором намагниченности \vec{I} и магнитной восприимчивостью χ или магнитной проницаемостью $\mu = 1 + \chi$. Величины μ и χ безразмерные, а намагниченность I измеряется в $\frac{A}{m}$.

Намагниченностью вещества \vec{I} называется векторная физическая величина, равная суммарному магнитному моменту атомов (молекул) единицы объёма вещества, т.е.

$$\vec{I} = \frac{\sum_i \vec{P}_{mi}}{\Delta V}, \quad (1)$$

где \vec{P}_{mi} – магнитный момент атома (молекулы).

Понятие магнитного момента \vec{P}_{mi} квантовомеханическое. Однако на простейшем примере можно дать представление о магнитном моменте. Для этого рассмотрим замкнутый круговой ток (рис. 1).

Такой круговой ток обладает магнитным моментом P_m , который равен произведению силы тока I на площадь S поверхности, охватываемой замкнутым током, т.е.

$$P_m = IS. \quad (2)$$

Единица измерения $P_m - [Am^2]$. Направление вектора \vec{P}_m определяется праввинтовой системой, как показано на рис. 1.

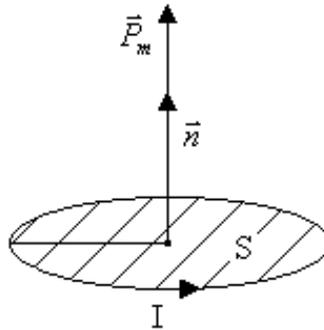


Рис. 1

В приближении классической физики электроны в атоме вращаются по круговым орбитам. Они, следовательно, создают электрический ток и соответственно обладают орбитальным магнитным моментом \vec{P}_e . Кроме того, электрон обладает собственным (спиновым) магнитным моментом \vec{P}_s . Поэтому результирующий магнитный момент равен сумме орбитального и спинового магнитных моментов всех электронов, входящих в атом.

Для изотропного и однородного магнетика намагниченность определяется формулой

$$\vec{I} = \chi \vec{H}, \quad (3)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля, $\frac{A}{m}$.

Напряженностью магнитного поля называется векторная физическая величина, равная

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{I}, \quad (4)$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции магнитного поля, которая является силовой характеристикой магнитного поля. Единица измерения В – [Тл] (Тл – тесла); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная.

Магнетики – это вещества, способные намагничиваться под действием внешнего магнитного поля H . В зависимости от величины магнитной восприимчивости χ магнетики делятся на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.

Вещества, у которых $\chi < 0$, а $|\chi| \ll 1$, т.е. $|\chi|$ порядка 10^{-8} , называются *диамагнетиками*. К ним относятся все инертные газы, Cu, Ca, Zn, Au, Ag, Sb, Si, P, Hg, вода, бензолы и др.

Диамагнетики намагничиваются противоположно внешнему магнитному полю H . Кривая намагничивания показана на рис. 2. Диамагнитные атомы не обладают результирующим магнитным моментом ($\vec{P}_m = 0$).

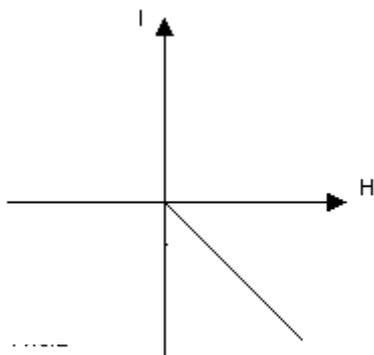


Рис. 2

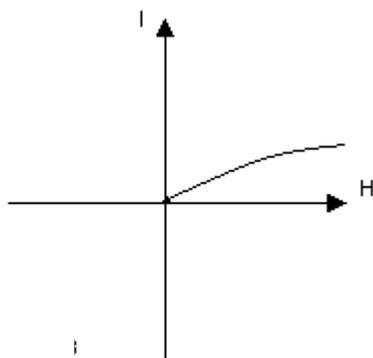


Рис. 3

Если $1 > \chi > 0$, но χ порядка 10^{-5} - 10^{-3} , то такие вещества называются *парамагнетиками*. Это O_2 , H_2 , лутеций Lu, иттрий Y, щелочные металлы, Mg, Al, Ti, V, Mo, многие химические соединения, $FeCl_2$, MnO и другие. Атомы, ионы, молекулы этих элементов обладают результирующим магнитным моментом ($\vec{P}_m \neq 0$). Кривая намагничивания показана на рис. 3.

У парамагнетиков магнитная восприимчивость зависит от температуры:

$$\chi = \frac{C}{T}, \quad (5)$$

где C – постоянная Кюри.

Парамагнетики намагничиваются вдоль магнитного поля H .

У *ферромагнетиков* магнитная восприимчивость велика и достигает величины до 10^6 . Это железо Fe, никель Ni, кобальт Co, гадолиний Gd, редкоземельные металлы (РЗМ), такие как гольмий Ho, диспрозий Dy, тербий Tb и др., а также их сплавы, химические соединения, например: SmCo_5 , TbFe_2 , Fe+Ni+Co и другие. Ферромагнетики обладают необычными физическими свойствами:

а) они имеют нелинейную сложную кривую намагничивания (рис. 4), которая называется петлей гистерезиса: H_c - *коэрцитивная сила*, это величина напряженности обратного магнитного поля, при котором намагниченность I ферромагнетика равна нулю; I_R называется *остаточной намагниченностью*;

б) намагниченность насыщения I_s зависит от температуры (рис. 5); T_c – это температура Кюри, т.е. такая температура, ниже которой ферромагнетик находится в ферромагнитном состоянии, а выше – в парамагнитном (т.е. в размагниченном) состоянии;

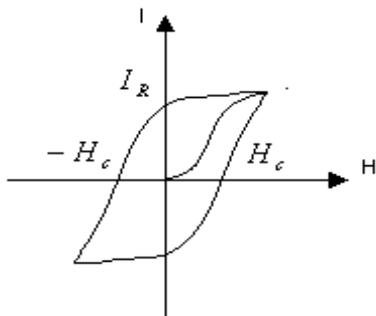


Рис. 4

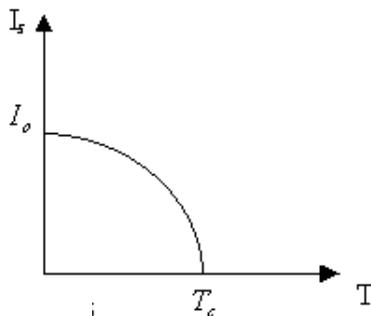


Рис. 5

в) магнитная восприимчивость χ ферромагнетика зависит от температуры (рис. 7) и магнитного поля H (рис. 6), выше температуры Кюри T_c зависимость восприимчивости определяется по формуле

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}; \quad (6)$$

г) при температуре Кюри T_c теплоемкость C_v при постоянном объеме испытывает скачок (рис. 8). Ферромагнетики обладают и другими необычными свойствами, например электрическими и упругими.

При перемагничивании ферромагнетика затрачивается энергия W , $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$. Величина энергии, затрачиваемой на совершение одного цикла перемагничивания единицы объема ферромагнетика, определяется формулой

$$W = \oint H dB. \quad (7)$$

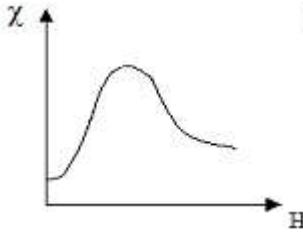


Рис. 6

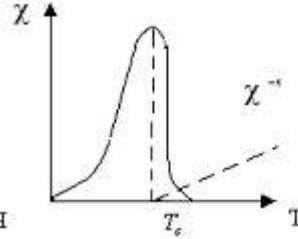


Рис. 7

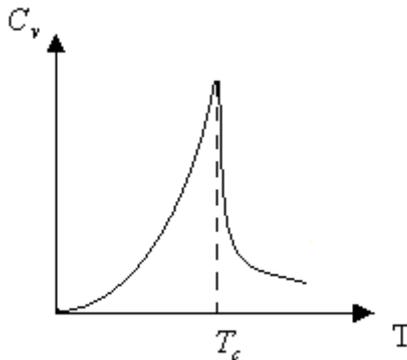


Рис. 8

Из рис. 4 видно, что интеграл $\oint HdB$ пропорционален площади S петли гистерезиса, т.е.

$$\oint HdB \sim S_n. \quad (8)$$

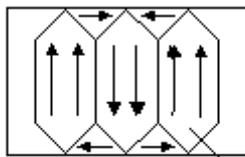
Эта энергия идет на нагревание ферромагнетика. У *магнитомягких ферромагнетиков* H_c мала, приблизительно меньше 10 А/м, и петля узкая, поэтому при перемагничивании они нагреваются меньше. Используются, главным образом, для изготовления магнитных сердечников, трансформаторов и дросселей. Примером магнитомягких ферромагнетиков является электротехническая сталь, никель Ni, пермалой Ni(40%)+Si(0,15%)+Mn(0,8%)+Fe(53%) и другие.

У *магнитотвердых ферромагнетиков* H_c очень велика, достигает до 10^6 А/м, петля широкая; они характеризуются большей магнитной энергией. Используются для изготовления постоянных магнитов, аудио- и видеокассет, памяти ЭВМ и др. Пример магнитотвердых ферромагнетиков – SmCo₅, Fe₃O₄, TbFe₂, ферриты-гранаты; 5Fe₂O₃ 3Me₂O₃, где Me=Y, Gd, Tb, Dy, Ho и т.д.

Необычные магнитные свойства (т.е. ферромагнетизм) у ферромагнетиков обусловлены наличием в них доменов.

Магнитный домен – это микрообласть размером порядка $10^{-3} \div 10^{-2}$ см, в которой спиновые магнитные моменты электронов ориентированы параллельно, так что данная область спонтанно (самопроизвольно) намагничена (рис. 9), т.е. магнитный домен можно представить как микроскопический магнит.

При определенных условиях (минимум полной энергии) ферромагнетик разбит на большее число доменов. Между доменами существует доменная граница. При температуре выше T_c и в отсутствии внешнего магнитного поля из-за теплового движения магнитные домены располагаются беспорядочно, так что в целом ферромагнетик находится в размагниченном состоянии. Под действием внешнего поля H домены ориентируются вдоль поля и ферромагнетик намагничивается.



Домен

Рис. 9

В настоящей работе задачей ставится получение кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью схемы Сойера-Тауэра (рис. 10).

Если на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подать напряжение $U_x \sim H$, а на вертикально отклоняющие пластины - напряжение $U_y \sim B$, то на экране осциллографа появится петля гистерезиса. Чтобы получить напряжение U_x и U_y , необходимо собрать схему, приведенную на рис. 10.

На ферромагнитный сердечник исследуемого образца, изготовленный в виде тора, наматывается тонкая проволока. Общее число витков первичной обмотки N . Внутри исследуемого сердечника при пропускании тока через обмотку создается магнитное поле с индукцией B . Напряженность магнитного поля, создаваемого обмоткой при прохождении тока I_1 , определяется формулой

$$H_1 = n_1 I_1, \quad (9)$$

где n_1 – число витков на 1 м длины тора.

Тогда напряжение обмотки можно определить исходя из закона Ома:

$$U_x = I_1 R_1, \quad (10)$$

где R_1 – сопротивление проволоки обмотки.

Подставляя (9) в (10), получим

$$U_x = \frac{R_1}{n_1} H. \quad (11)$$

Напряжение U_y равно напряжению на конденсаторе C , т.е.

$$U_y = \frac{q}{C}, \quad (12)$$

где q – заряд обкладок конденсатора; C – емкость конденсатора.

Заряд q на конденсаторе равен

$$q = \int I dt. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), получим

$$U_y = \frac{1}{C} \int I dt. \quad (14)$$

С другой стороны, при пропускании тока I_2 через вторичную обмотку N_2 в ней возникает ЭДС индукции E , которая по абсолютной величине равна

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = SN_2 \frac{dB}{dt}, \quad (15)$$

где $\Phi = N_2 SB$ - полный магнитный поток, пронизывающий поперечное сечение S сердечника; N_2 - число витков вторичной обмотки.

Электродвижущая сила индукции E равна напряжению на сопротивлении R_2 , исходя из второго правила Кирхгофа и с учетом того, что емкостное сопротивление $\frac{1}{\omega C}$ на конденсаторе много меньше активного сопротивления R_2 , т.е. $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$. Тогда

$$I_2 R_2 = E = SN_2 \frac{dB}{dt}, \quad \text{или} \quad I_2 = \frac{SN_2}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (16)$$

Подставляя (16) в (14), получим

$$U_y = \frac{SN_2}{R_2 C} \int \frac{dB}{dt} dt = \frac{SN_2}{R_2 C} B. \quad (17)$$

Из формул (11) и (17) получим искомые рабочие формулы:

$$H = \frac{n_1}{R_1} U_x, \quad (18)$$

и

$$B = \frac{CR_2}{SN_2} U_y. \quad (19)$$

Измерив U_x и U_y , можно определить абсолютные значения H и B в соответствующих единицах системы СИ.

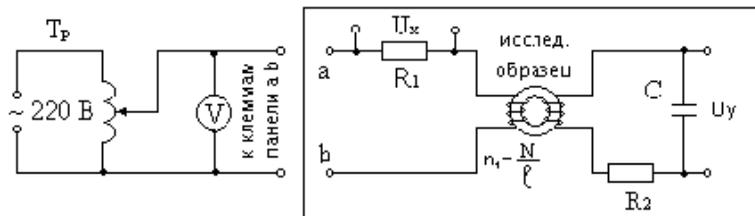


Рис. 10

Ход работы

Снятие кривой намагничивания

1. Собрать схему согласно рис. 10 (прежде чем включить ток, обязательно проверить с преподавателем или лаборантом электрическую схему).

2. С помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) установить напряжение по вольтметру 40 В.

3. Включить осциллограф. Рукоятку «Усиление» установить в положение «0,1 В/см». Напряжение U_y подать на вход «у» усилителя осциллографа, напряжение U_x на вход «х» осциллографа.

Для построения графика зависимости $B=f(H)$ определить координаты вершины петли (x , y), уменьшая напряжение U_{ab} через 5 вольт от максимального значения 40 В, при котором петля гистерезиса занимает практически всю площадь экрана осциллографа, до 0 В и вычисляя U_x и U_y для каждой координаты X и Y . Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

X , мм	
Y , мм	
U_x , В	
U_y , В	

$U_x = U'_x \cdot X$, где $U'_x = 0,1$ В/мм – масштаб по оси X .

$U_y = U'_y \cdot Y$, где $U'_y = 0,01$ В/мм – масштаб по оси Y .

Используя данные таблицы 1, по формулам (18) и (19) вычислить H и B для каждой точки петли.

Данные:

$n_1 = 3,6 \cdot 10^4$ вит/м; $N_2 = 165$ витков; $C = 10^{-5}$ Ф;

$R_1 = 150$ Ом; $R_2 = 11 \cdot 10^3$ Ом; $S = 1,6 \cdot 10^{-4}$ м².

Результаты расчета занести в таблицу 2.

Таблица 2

В, Тл	
Н, А/м	

Построить график зависимости $B = f(H)$.

Снятие петли гистерезиса и определение потерь на перемагничивание сердечника

1. Изображение петли гистерезиса скопировать с экрана осциллографа на кальку (при напряжении $U = 40$ В) и затем перевести изображение с кальки на миллиметровую бумагу.

2. Определить площадь S_n полученной петли гистерезиса в мм².

3. Вычисление затрат энергии на перемагничивание в единицу времени произвести по формуле

$$Q = k \cdot S_n \cdot \nu,$$

где Q – количество тепла, выделяемого в единице объема за единицу времени, Дж/(с · м³); ν – частота переменного тока (50 Гц); k – переводной коэффициент, численно равный энергии, отнесенной к единице объема, соответствующей площади в 1 мм² на экране осциллографа; S_n – площадь петли гистерезиса в мм².

Так как масштаб по оси индукции при усилении вертикального усилителя 0,1 В/см равен $4,2 \cdot 10^{-2}$ Тл/мм, а масштаб по оси напряженности равен 24 А/(м·мм), то площадь 1 мм² соответствует 0,50 Дж/м³, т.е. $k = 1,01$ Дж/(м³·мм²). Величина $k \cdot S$ равна удельной энергии, затрачиваемой на перемагничивание за один цикл.

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. В чем заключается явление гистерезиса?
3. Начертите принципиальную электрическую схему рабочей установки.
4. Опишите метод снятия кривой намагничивания.

5. Как определить затраты на перемагничивание ферромагнетика?

Вопросы для защиты работы

1. На какие типы делятся магнетики? Каковы их основные свойства?

2. Какие ферромагнетики называются «магнитотвердыми», какие «магнитомягкими»?

3. Из каких ферромагнетиков изготавливаются сердечники трансформаторов и дросселей почему?

4. Как объяснить остаточную намагниченность ферромагнетика?

5. Объясните физический смысл коэрцитивной силы.

6. Выведите рабочие формулы (18) и (19).

7. Что собой представляет ферромагнитный домен?

8. Опишите кривую намагничивания ферромагнетика.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 46

ЗАТУХАЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Цель работы - наблюдение и изучение затухающих электрических колебаний с помощью осциллографа: определение периода колебаний, влияние параметров колебательного контура L , C , R на характер затухающих колебаний.

Приборы и принадлежности: осциллограф, набор колебательных контуров с изменяемыми параметрами L , C , R ; генератор прямоугольных импульсов.

Затухающие электрические колебания

Замкнутая цепь, состоящая из катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью C , представляет собой колебательный контур (рис. 1).

Предложим, что мы, разомкнув контур, зарядили конденсатор. Между пластинами конденсатора появится электрическое поле, которое будет обладать энергией $W_C = \frac{1}{2}CU^2$ (рис. 1, а). Замкнем

теперь конденсатор на катушку с индуктивностью. Конденсатор начнет разряжаться, и его электрическое поле будет уменьшаться. При этом в контуре возникнет электрический ток разряда конденсатора, а в цепи потечет ток, отчего в катушке появится магнитное поле. Но за счет явления самоиндукции, наблюдаемой в катушке L , ток в цепи нарастает медленно. Через время, равное четверти периода колебаний, конденсатор разрядится полностью и электрическое поле исчезнет, в этот момент времени ток в цепи будет максимальный. Но магнитное поле в катушке при этом достигнет максимума, а следовательно, энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля, определяемую формулой $W_L = \frac{1}{2} LI^2$ (рис.1 б).

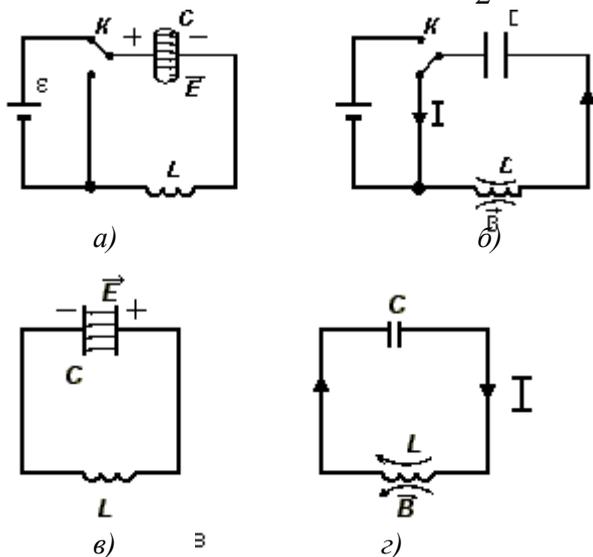


Рис. 1

В дальнейшие моменты времени магнитное поле будет исчезать, т.к. ток в цепи уменьшится до нуля. Это исчезающее поле вызовет экстраток самоиндукции, который в соответствии с законом Ленца будет стремиться поддерживать ток разряда. Поэтому конденсатор по отношению к первичному направлению тока будет перезаряжаться и между его пластинами появится электрическое поле противоположного направления. Через время, равное половине периода колебаний, магнитное поле исчезнет, ток в цепи равен нулю, электрическое поле достигнет максимума, а энергия магнитного

поля вновь превратится в энергию электрического поля (рис. 1в). В дальнейшем конденсатор будет снова разряжаться, и в контуре возникнет ток, направленный противоположно току в предыдущей стадии процесса. Через время $3/4 T$ конденсатор вновь окажется разряженным, а энергия электрического поля превратится в энергию магнитного поля (рис. 1, г) и ток в цепи станет максимальным. Через промежутки времени, равные полному периоду колебаний T , электрическое состояние контура будет таким же, как и в начале колебаний (рис. 1, а).

Если сопротивление контура равно нулю, то указанный процесс периодического превращения энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно будет продолжаться неограниченно долго, и мы получим собственные незатухающие электрические колебания.

Всякий реальный контур обладает активным сопротивлением, вследствие этого энергия, первоначально запасенная в конденсаторе, непрерывно расходуется на выделение джоулева тепла, так что амплитуда колебаний постепенно уменьшается и в конце концов колебания в контуре прекращаются. В этом случае в контуре наблюдаются свободные затухающие электрические колебания. Найдем закон изменения силы тока и напряжения.

Запишем для контура (рис. 2) второй закон Кирхгофа:

$$U_R + U_C = \varepsilon, \quad (1)$$

где $U_R = IR$ – падение потенциала на сопротивлении R ; $U_C = q/c$ – падение потенциала на обкладках конденсатора; C – емкость конденсатора; $\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$ – ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке; L – индуктивность катушки.

Подставляя выражения U_R , U_C и ε в (1), получим

$$IR + q/c = -L \frac{dI}{dt},$$

так как $q = CU_C$, а $I = dq/dt$, $dI/dt = C \frac{d^2U}{dt^2}$, то получим

$$\frac{d^2U_c}{dt^2} + \frac{RdU_c}{Ldt} + \frac{1}{LC}U_c = 0. \quad (2)$$

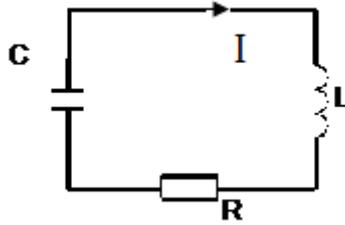


Рис. 2

Уравнение (2) – дифференциальное уравнение затухающих колебаний.

Обозначив

$$\frac{R}{L} = 2\beta; \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2, \quad (2a)$$

где β – коэффициент затухания; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ – частота собственных колебаний контура. Уравнение (2) с учетом (2a) можно записать в виде

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + 2\beta \frac{dU_c}{dt} + \omega_0^2 U_c = 0. \quad (3)$$

Найдем решение уравнения (3):

$$U_c = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega \cdot t - \varphi_0) = U_0 e^{-\frac{R}{2L} t} \cos(\omega \cdot t - \varphi_0), \quad (4)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота затухающих колебаний; U_0 , φ_0 – амплитуда и начальная фаза затухающих колебаний.

Величина $U_0 e^{-\beta t}$ выражает амплитуду затухающих колебаний.

Затухание колебаний происходит тем быстрее, чем больше омическое сопротивление контура R и чем меньше индуктивность.

Период затухающих колебаний T определяется формулой

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

Подставляя сюда вместо ω_0 и β (2а), получим

$$T_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (5)$$

В случае свободных незатухающих колебаний активное сопротивление контура равно нулю. Отсюда получим известную формулу Томсона

$$T_2 = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (6)$$

Амплитуда затухающих колебаний падения потенциала на конденсаторе

$$U_c = U_0 e^{-\frac{R}{2L}t}, \quad (7)$$

которая меняется во времени по экспоненциальному закону (рис. 3), где U_0 – значение амплитуды напряжения в момент времени $t=0$.

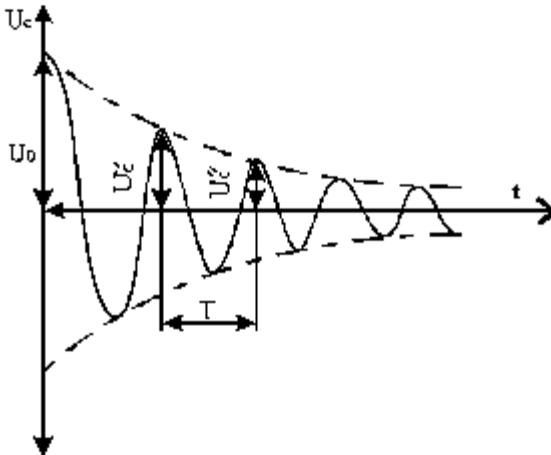


Рис. 3

Отношение соседних амплитуд, отстоящих друг от друга на время, равное одному периоду, называется декрементом затухания δ :

$$\delta = \frac{U'_c}{U''_c} = \frac{U_0 e^{-\frac{R}{2L}t}}{U_0 e^{-\frac{R}{2L}(t+T)}} = e^{\frac{R}{2L}T},$$

а логарифм этого отношения – логарифмическим декрементом затухания λ :

$$\lambda = \ln \delta = \ln e^{\frac{R}{2L}T} = \frac{R}{2L} T. \quad (8)$$

Из формулы (8) получим

$$T_2 = \frac{2L\lambda}{R} = \frac{2L}{R} \ln \frac{U'_c}{U''_c}. \quad (9)$$

При медленных затухающих колебаниях R мало по сравнению с L , и для периода колебаний справедлива формула (6). В этом случае формулу (8) с учетом (6) можно записать в виде

$$\lambda = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (10)$$

Ход работы

Осциллограммы затухающих колебаний можно получить с помощью установок, схемы которых приведены на рис. 4 и 5. Рис. 4 – схема установки с генератором прямоугольных импульсов. Рис. 5 – схема установки с осциллографом, имеющим генератор прямоугольных импульсов (рис. 5).

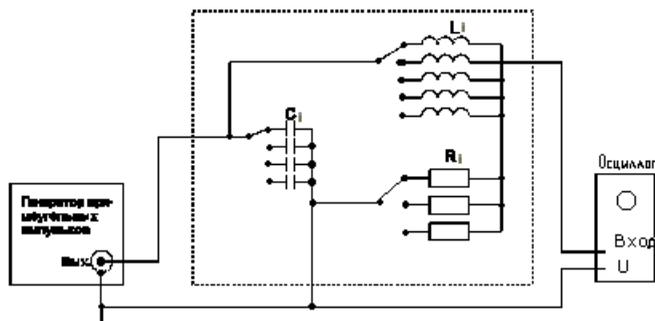


Рис. 4

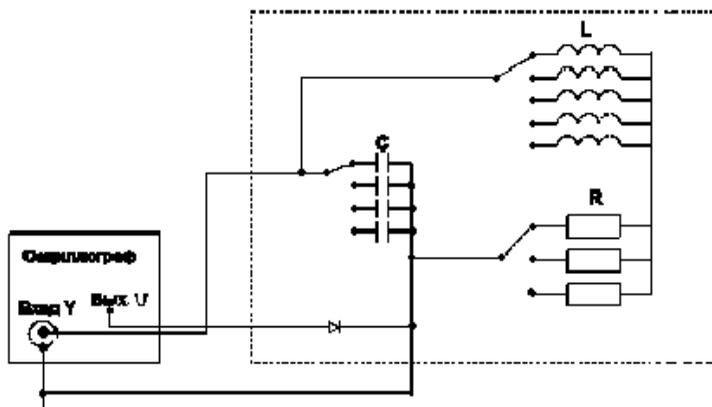


Рис. 5

1. Включить установку, собранную по одной из схем, приведенных на рис. 4 и 5.

2. Выбрать в соответствии с таблицей (или по указанию преподавателя) фиксированные параметры L , R и, меняя параметр C колебательного контура, изучить зависимость периода колебаний T от величины емкости колебательного контура.

3. В графу « T » занести значение периода колебаний, измеренное с помощью электронного осциллографа. В графу « T_1 » - значение периода затухающих колебаний, рассчитанное по формуле (5), а в графу « T_2 » - значение периода колебаний, рассчитанное по формуле (6).

4. Точно так же выбрать фиксированные значения C и R , меняя параметр L колебательного контура изучить зависимость периода колебаний от величины индуктивности контура.

5. Выбрав фиксированные значения C и L , меняя значение R изучить зависимость периода колебаний от сопротивления контура.

6. Зарисовать на кальку осциллограммы затухающих колебаний для тех же значений параметров L, C, R колебательного контура, затем перенести их на миллиметровую бумагу.

7. Измерить в миллиметрах величины соседних амплитуд U'_c и U''_c , отстоящих друг от друга на время равное одному периоду колебаний.

8. По формуле

$$\lambda' = \ell n \frac{U'_c}{U''_c} \quad (11)$$

рассчитать измеренное значение логарифмического декремента затухания.

9. По формуле (8) рассчитать значение логарифмического декремента затухания, исходя из параметров колебательного контура, и сравнить со значением (11).

Таблица

№ п/п	C	R	L	T	T ₁	T ₂	U' _c	U'' _c	λ
	мкФ	Ом	мГн	мс	мс	мс			
1		R-const R=20 Ом	L-const L=40мГн						
2									
3									
4	C-const C=0,03 3	R-const R=20 Ом							
5									
6									
7	C-const C=0,03 3		L-const L=40мГн						
8									
9									

10. На основании полученных данных сделать вывод о том, как влияют изменения параметров L, C, R колебательного контура на процесс затухания колебаний.

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Что представляет собой колебательный контур?
3. Что называется декрементом затухания, логарифмическим декрементом затухания?
4. Опишите предложенные методы измерения периода затухающих колебаний.

Вопросы для защиты работы

1. Опишите электрические колебания, возникающие в колебательном контуре.
2. Запишите уравнения и начертите графики:
 - а) собственных незатухающих электрических колебаний в контуре;
 - б) затухающих электрических колебаний в контуре.
3. Выведите формулу периода затухающих колебаний.
4. Как связан логарифмический декремент затухания с периодом колебания?
5. Выведите формулу периода незатухающих колебаний.
6. Как влияют величины сопротивления, емкости и индуктивности на частоту (период) собственных колебаний в контуре?
7. Как влияет на быстроту затухания колебаний величина сопротивления, емкости, индуктивности контура?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 47

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И СНЯТИЕ СЕМЕЙСТВА РЕЗОНАНСНЫХ КРИВЫХ

Цель работы - изучение вынужденных электрических колебаний и явления резонанса в электрических цепях; снятие семейства амплитудных резонансных кривых.

Приборы и принадлежности: звуковой генератор, милливольтметр переменного тока, микроамперметр переменного тока, конденсатор, катушка индуктивности, набор резисторов или магазин сопротивлений, соединительные провода.

Вынужденные электрические колебания

Пусть к электрической цепи, изображенной на рис. 1 и состоящей из последовательно соединенных конденсатора с электроемкостью C , катушки индуктивностью L и активного сопротивления R , подключен источник переменного тока с ЭДС, изменяющейся по закону

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos \omega t, \quad (1)$$

где ε_o - амплитуда ЭДС; ω - циклическая частота.

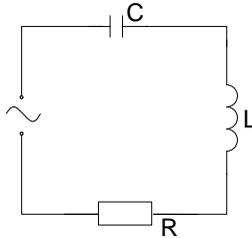


Рис. 1

В катушке L возникает ЭДС самоиндукции, которая определяется формулой

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}, \quad (2)$$

где L - индуктивность катушки; $\frac{dI}{dt}$ - скорость изменения силы тока в цепи.

В результате в такой цепи наблюдаются вынужденные электрические колебания и резонанс колебаний.

Найдем уравнения вынужденных колебаний. Цепь, состоящая из конденсатора C и катушки L, называется *колебательным контуром* (см. работу № 46).

Используя второй закон Кирхгофа, получим уравнение

$$I \cdot R + U_c = \varepsilon_o \cdot \cos \omega t - L \frac{dI}{dt},$$

или с учетом того, что напряжение на конденсаторе $U_c = \frac{q}{c}$, а сила

тока $I = \frac{dq}{dt}$, получим

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{c} = \varepsilon_o \cdot \cos \omega t. \quad (3)$$

Поделив (3) на L и учитывая выражения $\beta = \frac{R}{2L}$ (коэффици-

ент затухания) и $\omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ (циклическая частота собственных колебаний), формулу (3) можно записать в виде

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_o^2 \cdot q = \frac{\varepsilon_o}{L} \cos \omega t. \quad (4)$$

Это дифференциальное уравнение второго порядка вынужденных колебаний.

Решение уравнения (4) следует искать в виде

$$q = q_o \cos(\omega t - \varphi), \quad (5)$$

где φ и ω - начальная фаза и циклическая частота вынужденных колебаний; q_o - амплитуда заряда на обкладке конденсатора,

$$q_o = \frac{\varepsilon_o}{L\sqrt{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\beta\omega}{\omega_o^2 - \omega^2}. \quad (6)$$

Сила тока равна $I = \frac{dq}{dt} = \omega q_o \cdot \cos\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$, и с учетом

выражений $\psi = \varphi - \frac{\pi}{2}$ (сдвиг фазы между током и ЭДС источника тока) и $I_o = \omega q_o$ получим

$$I = I_o \cdot \cos(\omega t - \psi), \quad (7)$$

где $I_o = \omega q_o = \frac{\varepsilon_o \omega}{L\sqrt{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}};$ (8)

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega^2 - \omega_o^2}{2\beta\omega}. \quad (9)$$

Если в (8) и (9) подставим $\beta = \frac{R}{2L}; \omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, то получим

$$I_o = \frac{\varepsilon_o}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad (8')$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (9')$$

Напряжения в цепи изменяются по закону:

- на активном сопротивлении R

$$U_R = IR = U_{oR} \cos(\omega t - \psi); \quad (10)$$

- на конденсаторе с учетом $U_c = \frac{q}{C}$, $\varphi = \psi - \frac{\pi}{2}$, $\frac{q_o}{C} = U_{oc}$ и

(4)

$$U_c = U_{oc} \cdot \cos(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}). \quad (11)$$

- ЭДС самоиндукции, или напряжение в катушке,

$$U_L = U_{oL} \cos(\omega t - \psi + \frac{\pi}{2}). \quad (12)$$

В формуле (8') выражение

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (13)$$

называется *импедансом*, т.е. полным сопротивлением электрической цепи, а

$$x_L = L\omega \quad (14)$$

и

$$x_C = \frac{1}{\omega C} \quad (15)$$

называются *индуктивным* и *емкостным* сопротивлениями (*реактивными сопротивлениями*). Тогда с учетом (13) формулу (8') можно записать

$$I_o = \frac{U_o}{z}. \quad (16)$$

Формула (8'), или (16), соответствует закону Ома для амплитудных значений переменного тока. Амплитудное значение силы тока I_o зависит от ω , L, C и R.

Исследуем зависимость I_o от ω .

При $\omega \rightarrow 0$ $I_o \rightarrow 0$, при $\omega \rightarrow \infty$ I_o также стремится к нулю, т.е. $I_o \rightarrow 0$.

Приравнявая $\frac{dI}{d\omega}$ нулю, найдем резонансную частоту, которая не зависит от R и равна

$$\omega_p = \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (17)$$

При этой частоте из (8) следует, что максимальное значение амплитуды силы тока равно

$$I_{om} = \frac{U_o}{R}. \quad (18)$$

С ростом R , а следовательно, коэффициента затухания $\beta = \frac{R}{2L}$, I_{om} уменьшается.

Зависимость резонансных кривых I_o от ω показана на рис. 2.

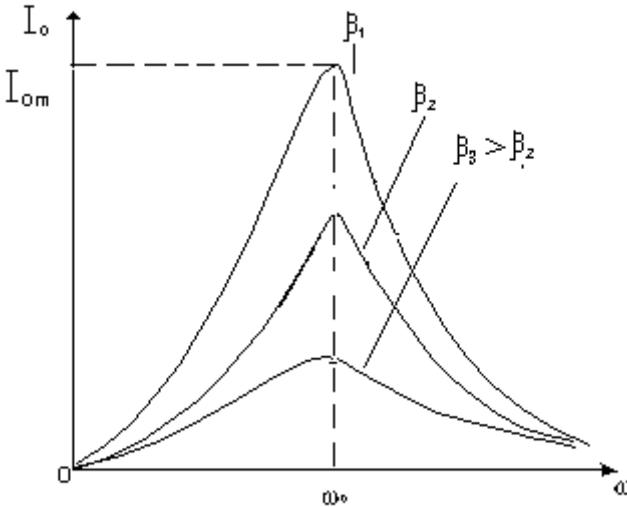


Рис. 2

Резонансные кривые амплитудных значений напряжения отличаются от резонансных кривых силы тока.

На рис. 3 приведена зависимость изменения резонансных кривых между обкладками конденсатора от частоты ω и коэффициента затухания β .

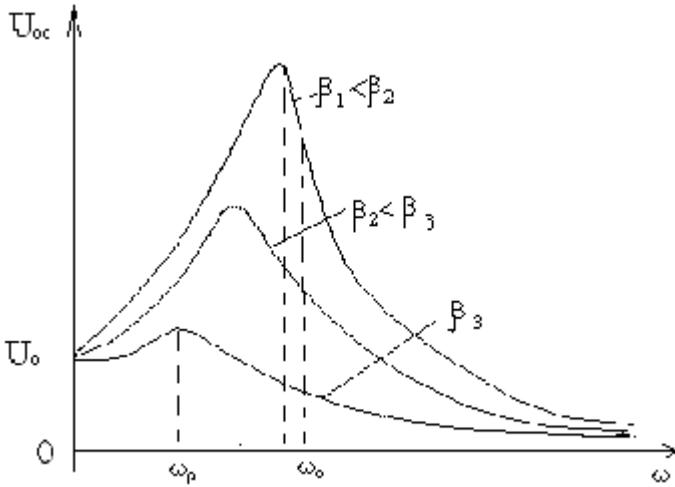


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что при $\omega \rightarrow 0$ амплитудное значение напряжения U_{oc} стремится к $U_0 = \varepsilon_0$. Резонанс колебаний напряжения U_{oc} наступает при частоте

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}. \quad (19)$$

Изучить резонанс колебаний силы тока можно, собрав электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 4.

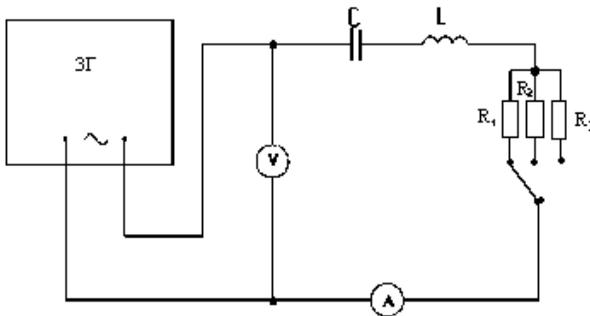


Рис. 4

Ход работы

1. Установить на звуковом генераторе начальное значение частоты $\nu_1 = 200 \text{ Гц}$.

2. С помощью регулятора напряжения установить на выходе звукового генератора напряжение, равное 30 мВ.

3. Включить в цепь последовательно с катушкой L и конденсатором C сопротивления (сначала R_1 , затем R_2, R_3).

4. Измерить значения силы тока I_1, I_2, I_3 , изменяя значения частоты в интервале от 200 до 2000 Гц через каждые 200 Гц, поддерживая напряжение в цепи неизменным с помощью регулятора напряжения. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

V, Гц	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2500	3000
I ₁ , мкА R ₁ =												
I ₂ , мкА R ₂ =												
I ₃ , мкА R ₃ =												

4. По результатам измерений на миллиметровой бумаге построить семейство амплитудных резонансных кривых.

5. По полученному графику зависимости I_o от (ν) и по максимальному значению силы тока I_{om} определить резонансную частоту $\nu_o^{экс}$.

6. По формуле

$$\nu_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (20)$$

рассчитать значение резонансной частоты ν_o , подставляя параметры L и C электрической цепи.

7. Сравнить экспериментальное значение $\nu_o^{экс}$ и рассчитанное по формуле (20) значение ν_o .

Вопросы для допуска к работе

1. Сформулируйте цель работы.
2. Какие колебания называются свободными?
3. Какие колебания называются вынужденными?
4. Запишите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний.
5. Что называется резонансом колебаний?

Вопросы для защиты работы

1. Что называется колебательным контуром? Объясните возникновение вынужденных электрических колебаний в цепи переменного тока.
2. Выведите закон Ома для электрической цепи переменного тока, содержащей омическое сопротивление, емкость и индуктивность.
3. Получите дифференциальное уравнение вынужденных электрических колебаний.
4. Выведите формулу для резонансных частот колебаний силы тока и напряжения.
5. Изобразите и поясните ход резонансных кривых (амплитудных и фазовых).
6. Что такое полное сопротивление (импеданс) переменной электрической цепи?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 48

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Цель работы - изучение законов постоянного тока и простейших приемов расчета разветвленных электрических цепей; определение удельного сопротивления материала проводника.

Приборы и принадлежности: установка ФРМ-01.

Законы постоянного тока

Данная лабораторная работа посвящена изучению законов постоянного тока, знакомству с простейшими приемами расчета разветвленных электрических цепей. Выполняя ее, студенты приобре-

тают необходимые навыки работы с электроизмерительными приборами, оценивают погрешность экспериментального определения физической величины (в данном случае – удельного сопротивления металлической проволоки).

В ходе эксперимента изучаются два способа измерений: в одном из них сопротивление определяют путем точного измерения тока, проходящего через искомое сопротивление, в другом – путем точного измерения напряжения на этом сопротивлении. Исследуются условия, при которых достигается максимальная точность измерения по каждому из рассмотренных способов, оценивается роль внутреннего сопротивления электроизмерительных приборов в том и другом случае. В ходе работы студенты должны научиться правильно выбирать и обосновывать оптимальный вариант эксперимента.

Определение удельного сопротивления однородной изотропной металлической проволоки осуществляется косвенным путем из

формулы $R = \rho \frac{l}{S}$.

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление проволоки; R – активное сопротивление исследуемого отрезка; S – площадь поперечного сечения проволоки; l – длина отрезка.

При измерении этих величин наибольшие трудности вызывает экспериментальное определение активного сопротивления R отрезка проволоки. Для этого его включают в электрическую цепь постоянного тока, измеряют силу проходящего через него тока I и разность потенциалов (напряжение) между его концами U . Затем по закону Ома для однородного участка цепи $I = \frac{U}{R}$ рассчитывают

сопротивление $R = \frac{U}{I}$.

Сложность заключается в том, что невозможно составить такую электрическую цепь, которая состояла бы из амперметра, вольтметра и измеряемого сопротивления и позволяла бы одновременно определять точное значение силы тока через сопротивление и точное значение напряжения на нем. Существуют два простейших варианта схемы электрических цепей. Одна из них позволяет

измерить точное значение силы тока через сопротивление (рис. 1), а другая – точную величину напряжения на нем (рис. 2).

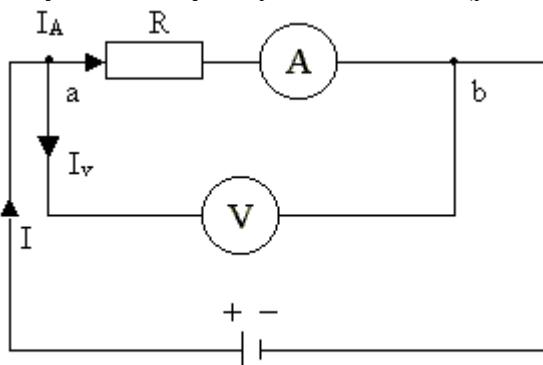


Рис. 1

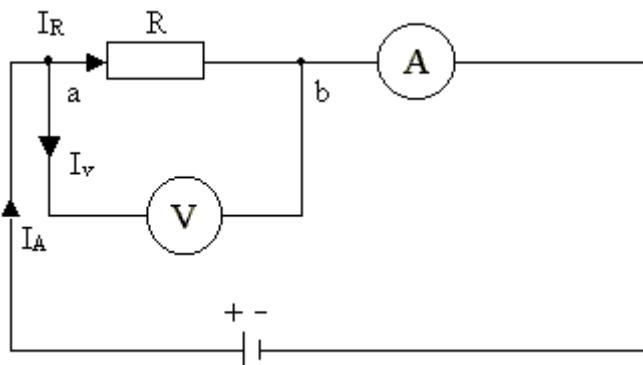


Рис. 2

В самом деле, амперметр на рис. 1 показывает силу тока I_A , проходящего через сопротивление R . Однако вольтметр показывает напряжение на участке ab , а не на сопротивлении R .

С другой стороны, вольтметр на рис. 2 показывает точную величину напряжения на сопротивлении R . Однако амперметр показывает силу тока I_A , а не величину тока I_R через сопротивление.

Таким образом, ни в том, ни в другом случае нельзя найти сопротивление R , используя только показания вольтметра и амперметра: измерительные приборы, обладая внутренним сопротивлением, влияют на распределение токов и потенциалов в электрической цепи. Поэтому для расчета R необходимо наряду с показаниями

ми приборов учитывать их внутренние сопротивления. Расчет производят используя закон Ома и правила Кирхгофа для разветвленных электрических цепей.

Правила Кирхгофа:

1) алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в любом узле (узлом называется место соединения трех и более проводников), равна нулю, т.е.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 ;$$

2) для любого замкнутого контура алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков цепи равна алгебраической сумме всех ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k .$$

Для определения знаков ЭДС и напряжений выбираем обход замкнутого контура по часовой стрелке. Если при обходе контура направление тока на участке цепи совпадает с обходом, то знак напряжения берется со знаком (+), в противном случае – со знаком (-). ЭДС считаются положительными, если они создают ток, по направлению совпадающий с направлением обхода контура, в противном случае они считаются отрицательными.

Описание установки и метода измерений

В данной работе сопротивление нихромовой проволоки определяют с помощью прибора FPM-01, имеющего два режима измерений: по схеме рис. 1 и по схеме рис. 2. Общий вид прибора представлен на рис. 3. К основанию прибора прикреплена колонна 1 с нанесенной метрической шкалой 2, которая позволяет определять длину отрезка нихромовой проволоки. На колонне смонтирован подвижный кронштейн 3, имеющий электрический контакт с проволокой 4. В измерительной части прибора 5 расположены: сетевой выключатель 6, регулятор тока 7, вольтметр 8 и амперметр 9. Переключатель рода работы 10 служит для выбора режима измерений: ненажатая кнопка обеспечивает работу прибора по схеме рис. 1; нажатая – по схеме рис. 2. С помощью кнопки 11 – подключают измерительную часть прибора.

В первом случае (рис. 1) в показаниях вольтметра учитывается наличие у амперметра внутреннего сопротивления (R_A): напряжение на ab состоит из двух слагаемых:

$$U_{ab} = U_R + U_{RA}, \quad (2)$$

где U_{ab} – напряжение на участке ab , т.е. величина, которую показывает вольтметр; U_R – напряжение на сопротивлении R ; U_{RA} – напряжение на внутреннем сопротивлении амперметра.

Сопротивление R соединено последовательно с амперметром, сопротивление которого R_A . Общее сопротивление равно $R+R_A$. Согласно закону Ома

$$U_{ab} = I_A (R + R_A). \quad (3)$$

Из (2) и (3) найдем $I_A R = U_{ab} - I_A R_A$. Тогда искомое сопротивление равно

$$R = \frac{U_{ab} - I_A R_A}{I_A} = \frac{U_{ab}}{I_A} - R_A,$$

или

$$R = \frac{U}{I} - R_A, \quad (4)$$

где U – напряжение, показываемое вольтметром; I – сила тока по показанию амперметра; R_A – внутреннее сопротивление амперметра.

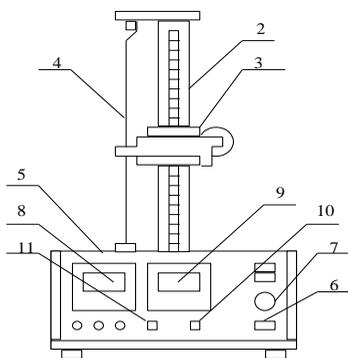


Рис. 3

Во втором случае (рис. 2) сила тока, текущего через сопротивление R , не совпадает с показанием амперметра из-за наличия

внутреннего сопротивления R_V у вольтметра; ток I_A , силу которого показывает амперметр, согласно первому закону Кирхгофа (для узла “ b ”), равен

$$I_A - I_R - I_V = 0, \quad (5)$$

где I_A – сила тока, протекающего через амперметр; I_R – сила тока, протекающего через измеряемое сопротивление; I_V – сила тока, протекающего через вольтметр.

Силу тока I_V можно найти, применив второе правило Кирхгофа для контура $abVa$ и выбрав направление его обхода по часовой стрелке:

$$I_R R - I_V R_V = 0, \quad (6)$$

где R_V – внутреннее сопротивление вольтметра.

С учетом того, что $I_R R = U$, из (6) получаем значение

$$I_V = \frac{U}{R_V}$$

и, подставляя его в (5), находим

$$I_R = I_A - \frac{U}{R_V}. \quad (7)$$

Исходя из закона Ома $U = I_R R$, найдем неизвестное сопротивление

$$R = \frac{U}{I_R} = \frac{U}{I_A - \frac{U}{R_V}}, \quad (8)$$

или, упрощая обозначения,

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}},$$

где U – напряжение, показываемое вольтметром; I – сила тока по показанию амперметра; R_V – внутреннее сопротивление вольтметра.

Анализ формул (3) и (5) и электрических схем, изображенных на рис. 1, 2, показывает, что в первом случае показания вольтметра

будут тем ближе к величине напряжения на измеряемом сопротивлении, чем меньше внутреннее сопротивление амперметра по сравнению с R . Во втором случае показания амперметра будут тем ближе к значению силы тока, протекающего через искомое сопротивление, чем меньший ток будет протекать через вольтметр, т.е. чем больше внутреннее сопротивление вольтметра по сравнению с R . Таким образом, первую схему измерений наиболее целесообразно применять при условии $R \gg R_A$, вторую – при условии $R \ll R_V$. В зависимости от конкретных значений сопротивлений R , R_A и R_V необходимо выбирать первую или вторую схему измерений.

Рабочие формулы для определения удельного сопротивления в данной работе можно получить, подставляя в (1) выражения (4) (при измерении по первой схеме) и (8) (при измерении по второй схеме). Тогда соответственно получим

$$\rho_1 = \left(\frac{U}{I} - R_A \right) \frac{S}{l}, \quad (9)$$

$$\rho_2 = \frac{US}{\left(I - \frac{U}{R_V} \right) l}. \quad (10)$$

Ход работы

1. Нажатием кнопки 6 прибор включить в сеть, а нажатием кнопки 11 подключить его измерительную схему. После этого прибор готов к работе.

2. Переключатель 10 оставить в нажатом положении. При этом измерения производятся по схеме рис. 1 (точное измерение силы тока).

3. Передвинуть кронштейн 3 на отметку 40 см вверх.

4. При помощи регулятора 7 установить значение силы тока 240 мА по амперметру 9 (стрелка вольтметра 8 должна при этом отклониться не менее чем на $2/3$ измерительного диапазона).

5. Установить кронштейн 3 на отметке 32 см (при этом $l = 0,32$ м) и снять показание вольтметра U .

6. По формуле (9) рассчитать удельное сопротивление ρ .

7. Измерения и вычисления повторить для значений $l=0,36$ м; $0,40$ м; $0,44$ м; $0,48$ м или близких к ним.

8. Рассчитать среднее значение удельного сопротивления $\langle \rho \rangle$, абсолютную $\Delta \rho$ и относительную E погрешности измерений, используя эталонное значение удельного сопротивления ρ_0 .

9. Полученные данные занести в верхнюю половину таблицы 2, представив результаты в виде $\rho = \langle \rho \rangle \pm \Delta \rho$.

10. Нажать переключатель 10, что позволит производить измерения по схеме рис. 2 (точное измерение напряжения). Провести операции, указанные в пп. 3-8, заменив в п. 6 расчет по формуле (9) на расчет по формуле (10).

11. Данные, полученные при вычислениях и измерениях с нажатым переключателем 10 (см. п. 10), занести в нижнюю половину таблицы 2, представив результаты измерений в виде $\rho = \langle \rho \rangle \pm \Delta \rho$.

Таблица 1

Параметры измерительной схемы

R_A , Ом	R_V , Ом	S , мм ²	I , А	ρ_0 , Ом м
0,15	2500	0,10	0,240	$1,06 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

Результаты измерений и вычислений

Режим работы	№ п/п	l , м	U , В	ρ , Ом м	$\langle \rho \rangle$, Ом м	$\Delta \rho = \rho_0 - \langle \rho \rangle $, Ом м	E , %
Точное измерение токов	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
Точное измерение напряжения	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

Вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Какие способы измерения активного сопротивления используются в данной работе?
3. Опишите рабочую установку и ход эксперимента.
4. Запишите рабочие формулы и поясните физический смысл входящих в них величин.

Вопросы для защиты работы

1. Сформулируйте правила Кирхгофа для расчета разветвленных электрических цепей.
2. Выведите рабочие формулы (9) и (10).
3. При каких соотношениях R , R_A и R_V пользуются первой схемой измерения? Второй? Объясните.
4. Сравните результаты, полученные в данной работе первым и вторым способом. Какие выводы можно сделать относительно точности измерений этими способами? Почему?
5. Почему в п.4 регулятор устанавливают в такое положение, чтобы стрелка вольтметра отклонялась не менее чем на $2/3$ шкалы?
6. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи.
7. Сформулируйте физический смысл удельного сопротивления ρ . От каких факторов зависит эта величина (см. работу № 32)?
8. От каких факторов зависит сопротивление R однородного изотропного металлического проводника?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 49

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА

Цель работы - определение индуктивности соленоида по его сопротивлению переменному току.

Приборы и принадлежности: исследуемый соленоид, звуковой генератор, электронный осциллограф, миллиамперметр переменного тока, соединительные провода.

Явление самоиндукции. Индуктивность

Явление электромагнитной индукции наблюдается во всех случаях, когда изменяется магнитный поток, пронизывающий проводящий контур. В частности, если электрический ток течет в проводящем контуре, то он создает пронизывающий этот контур магнитный поток Φ .

При изменении силы тока I в любом контуре изменяется и магнитный поток Φ , вследствие этого в контуре возникает электродвижущая сила (ЭДС) индукции, которая вызывает дополнительный ток (рис. 1, где 1 - проводящий замкнутый контур, 2 - силовые линии магнитного поля, создаваемого током контура). Это явление называется *самоиндукцией*, а дополнительный ток, вызываемый ЭДС самоиндукции, – *экстраток*ом самоиндукции.

Явление самоиндукции наблюдается в любой замкнутой электрической цепи, в которой протекает электрический ток, при замыкании или размыкании этой цепи.

Рассмотрим, от чего зависит величина ЭДС ε_s самоиндукции. Магнитный поток Φ , пронизывающий замкнутый проводящий контур, пропорционален магнитной индукции B магнитного поля, создаваемого током, протекающим в контуре, а индукция B пропорциональна силе тока.

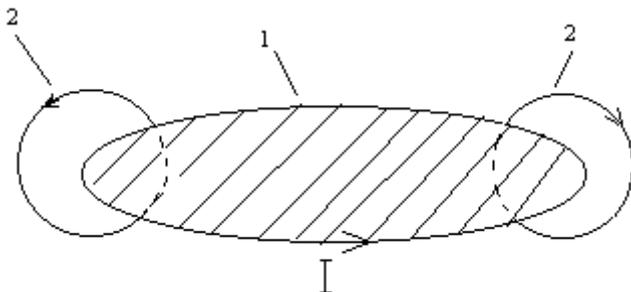


Рис. 1

Тогда магнитный поток Φ пропорционален силе тока, т.е.

$$\Phi = L \cdot I, \quad (1)$$

где L - индуктивность контура, Гн (Генри).

Из (1) получим

$$L = \Phi / I. \quad (2)$$

Индуктивностью контура L называется скалярная физическая величина, равная отношению магнитного потока Φ , пронизывающего данный контур, к величине силы тока, текущего в контуре.

Генри - это индуктивность такого контура, в котором при силе тока в 1А возникает магнитный поток 1Вб, т.е. $1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}}$.

Согласно закону электромагнитной индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3)$$

Подставляя (1) в (3), получим ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_s = -L\frac{dI}{dt}. \quad (4)$$

Формула (4) справедлива при $L=\text{const}$.

Опыт показывает, что при увеличении индуктивности L в электрической цепи сила тока в цепи увеличивается постепенно (см. рис. 2), а при уменьшении L сила тока уменьшается так же медленно (рис. 3).

Сила тока в электрической цепи при замыкании изменяется по закону $I = I_o \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$, а при размыкании – по закону $I = I_o e^{-\frac{R}{L}t}$.

Кривые изменения силы тока показаны на рис. 2 и 3.

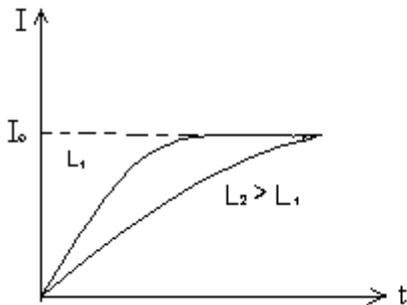


Рис. 2

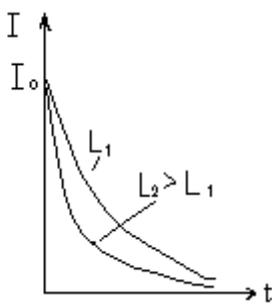


Рис.3

Индуктивность контура зависит от формы, размеров и деформации контура, от магнитного состояния среды, в которой находится контур, а также от других факторов.

Найдем индуктивность соленоида. *Соленоид* - это цилиндрическая трубка, изготовленная из немагнитного непроводящего ма-

териала, на которую плотно, виток к витку, намотана тонкая металлическая проводящая проволока. На рис. 4 показан разрез соленоида вдоль цилиндрической трубки по диаметру (1 - силовые линии магнитного поля).

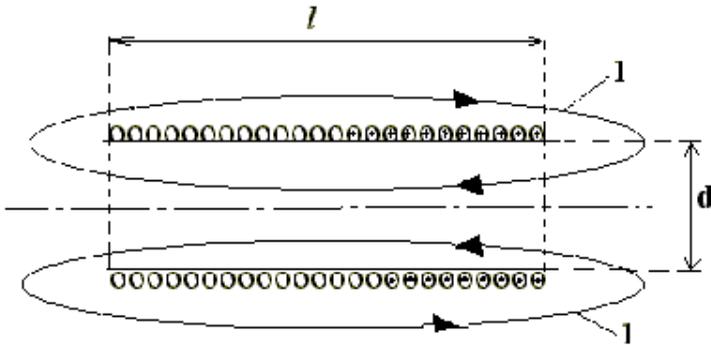


Рис. 4

Длина l соленоида намного больше, чем диаметр d , т.е. $l \gg d$. Если $l < d$, то соленоид можно рассматривать как короткую катушку.

Диаметр тонкой проволоки намного меньше, чем диаметр соленоида. Для увеличения индуктивности внутрь соленоида помещают ферромагнитный сердечник с магнитной проницаемостью μ . Если $l \gg d$, то при протекании тока внутри соленоида возбуждается однородное магнитное поле, индукция которого определяется формулой

$$B = \mu_0 \mu n I, \quad (5)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $n = N/l$ – число витков единицы длины соленоида; N – число витков соленоида.

Вне соленоида магнитное поле практически равно нулю. Поскольку соленоид имеет N витков, то полный магнитный поток Ψ (потокосцепление), пронизывающий поперечное сечение S соленоида, равен

$$\Psi = N\Phi = NBS, \quad (6)$$

где $\Phi = BS$ – поток, пронизывающий один виток соленоида.

Подставляя (5) в (6) и с учётом того, что $N = nl$, получим

$$\Psi = \mu_0 \mu n^2 l S I. \quad (7)$$

С другой стороны,

$$\Psi = LI. \quad (8)$$

Сравнивая (7) и (8), получим

$$L = \mu_0 \mu n^2 l S = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S. \quad (9)$$

Площадь сечения соленоида равна

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (10)$$

С учётом (10) формула (9) запишется в виде

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} \cdot \frac{\pi d^2}{4}. \quad (11)$$

Определить индуктивность соленоида можно, подключив соленоид в электрическую цепь переменного тока с частотой ω . Тогда полное сопротивление (импеданс) определится формулой

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (12)$$

где R – активное сопротивление, Ом; $\omega L = x_L$ – индуктивное сопротивление; $\frac{1}{\omega C} = x_c$ – ёмкостное сопротивление конденсатора с ёмкостью C .

Если в электрической цепи отсутствует конденсатор, т.е. электроёмкость цепи мала, то $x_c \ll x_L$ и формула (12) будет иметь вид

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (13)$$

Тогда закон Ома для переменного тока запишется в виде

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}}, \quad (14)$$

где I_m , U_m – амплитудные значения силы тока и напряжения.

Так как $\omega = 2\pi\nu$, где ν – частота колебаний переменного тока, то (14) примет вид

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (L2\pi\nu)^2}}. \quad (15)$$

Из (15) получим рабочую формулу для определения индуктивности:

$$L = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_m}{I_m}\right)^2 - R^2}}{2\pi\nu}. \quad (16)$$

Ход работы

Для выполнения работы собрать цепь по схеме рис. 5.

1. Установить на звуковом генераторе частоту колебаний, указанную преподавателем.

2. Измерить с помощью осциллографа амплитуду напряжения U_m и частоту ν .

3. С помощью миллиамперметра определить действующее значение силы тока в цепи I_e ; пользуясь соотношением $I_e = I_m / \sqrt{2}$ и решая его относительно $I_m = \sqrt{2} I_e$, определить амплитуду тока в цепи.

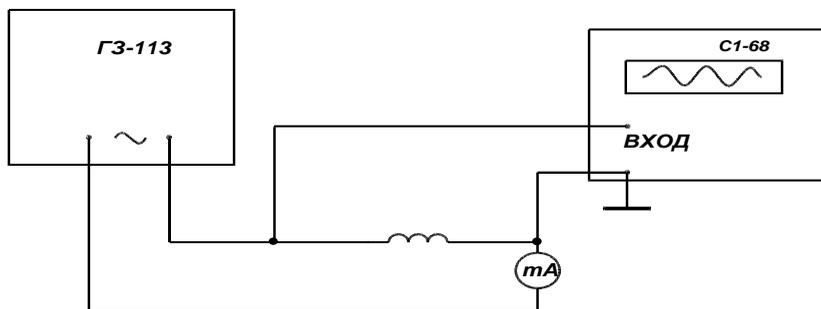


Рис. 5

4. Данные занести в таблицу.

Таблица

ν , Гц	I_e , мА	I_m , мА	U_m , В	R , Ом	N	d , м	l , м	L , Гн	$L_{\text{проб}}$, Гн	$\Delta L = L - L_{\text{проб}}$, Гн

6. По формуле (16) рассчитать индуктивность соленоида.

7. По формуле (11) рассчитать проверочное значение индуктивности соленоида, исходя из его геометрии и числа витков.

Справочные данные: активное сопротивление соленоида $R = 56$ Ом; длина соленоида $l = 40$ см; диаметр соленоида $d = 2$ см; число витков соленоида $N = 2000$.

Рекомендуемая частота переменного тока $\nu = 1 \div 20 \text{ кГц}$.

Вопросы для допуска к работе

1. Сформулируйте цель работы.
2. Дайте определение индуктивности?
3. Какова единица измерения индуктивности?
4. Запишите рабочую формулу для определения индуктивности соленоида.

Вопросы для защиты работы

1. Получите формулу для определения индуктивности соленоида, исходя из его геометрических размеров и числа витков.
2. Что называется импедансом?
3. Как связаны между собой максимальное и действующее значения силы тока и напряжения в цепи переменного тока?
4. Выведите рабочую формулу индуктивности соленоида.
5. Опишите явление самоиндукции.
6. Каков физический смысл индуктивности?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.Г. Курс общей физики. Т.2, Т. 4. – М.: Высш. шк., 2002. – 325 с.
2. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. – М.: Высш. шк., 1970. – 448 с.
3. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Высш. шк., 1977. – 378 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: «Академия», 2006. – 560с.
5. Парселл Э. Электричество и магнетизм.- М.: Наука, 1971.- 448 с.
6. Детлаф А.А. Курс физики: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: «Академия», 2008. – 720 с.
7. Кортнев А.В. Практикум по физике.- М.: Высш. шк., 1968. - 325 с.
8. Иверонова В.И. Физический практикум.- М.: Физматгиз, 1962.- 956 с.

Приложение

Фундаментальные физические константы

Величина	Обозначение	Значение	Относительная погрешность, 10^{-6}
1	2	3	4
Атомная единица массы	а.е.м	$1,6605655(86) \cdot 10^{-27}$ кг	5,1
Заряд элементарный	e	$1,6021892(46) \cdot 10^{-19}$ Кл	2,9
Заряд удельный электрона	$-e/m_e$	$-1,7588047(49) \cdot 10^{11}$ Кл/кг	2,8
Комптоновская длина волны нейтрона	$\lambda_{К,n}=h/(m_n c)$	$1,3195909(22) \cdot 10^{-15}$ м	1,7
	$\lambda_{К,n}/(2\pi)$	$2,1001941(35) \cdot 10^{-16}$ м	1,7
Комптоновская длина волны протона	$\lambda_{К,p}=h/(m_p c)$	$1,3214099(22) \cdot 10^{-15}$ м	1,7
	$\lambda_{К,p}/(2\pi)$	$2,1030892(36) \cdot 10^{-16}$ м	1,7
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_{К,e}=h/(m_e c)$	$2,4263089(40) \cdot 10^{-12}$ м	1,6
	$\lambda_{К,e}/(2\pi)$	$3,8615905(64) \cdot 10^{-13}$ м	1,6
Магнетон Бора	$\mu_B=e\hbar/(2m_e)$	$9,274078(36) \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл	3,9
Ядерный магнетон	$\mu_{Яд}=e\hbar/(2m_p)$	$5,050824(20) \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл	3,9
Магнитный момент нейтрона	$\mu_n/\mu_{Яд}$	-1,91304184(88)	0,46
Магнитный момент протона	μ_p	$1,4106171(55) \cdot 10^{26}$ Дж/Тл	3,9
	μ_p/μ_B	$1,521032209(16) \cdot 10^{-3}$	0,011
	$\mu_p/\mu_{Яд}$	2,7928456(11)	0,38

1	2	3	4
Магнитный момент электрона	μ_e μ_e/μ_p	$9,284832(36) \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл 658,2106880(66)	3,9 0,010
Масса нейтрона	m_n	$1,6749543(86) \cdot 10^{-27}$ кг 1,008665012(37) а.е.м.	5,1 0,037
Масса протона	m_p	$1,6726485(86) \cdot 10^{-27}$ кг 1,007276470(11) а.е.м.	5,1 0,011
Масса электрона	m_e	$0,9109534(47) \cdot 10^{-30}$ кг $5,4858026(21) \cdot 10^{-4}$ а.е.м.	5,1 0,38
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях ($T_0=273,15$ К, $p_0=101323$ Па)	$V_m=RT_0/p_0$	$0,02241383(70)$ м ³ /моль	31
Постоянная Авогадро	N_A	$6,022045(31) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹	5,1
Постоянная Больцмана	$k=R/N_A$	$1,380662(44) \cdot 10^{-23}$ Дж/К	32
Постоянная газовая универсальная	R	$8,31441(26)$ Дж/(моль·К)	31
Постоянная гравитационная	G, γ	$6,6720(41) \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²	615
Постоянная магнитная	μ_0	$12,5663706144 \cdot 10^{-7}$ Гн/м	
Постоянная Планка	h $\hbar = h/(2\pi)$	$6,626176(36) \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц $1,0545887(57) \cdot 10^{-35}$ Дж/Гц	5,4 5,4
Квант магнитного потока	$\Phi_0 = h/(2\pi e)$ h/e	$2,0678506(54) \cdot 10^{-15}$ Вб 4,135701(11) $\cdot 10^{15} \frac{\text{Дж}}{\text{Гц} \cdot \text{Кл}}$	2,6 2,6

1	2	3	4
Квант циркуляции	$h/(2m_e)$	$3,6369455(60) \cdot 10^{-4} \frac{\text{Джс}}{\text{Гц} \cdot \text{Кл}}$	1,6
	h/m_e	$7,273891(12) \cdot 10^{-4} \frac{\text{Джс}}{\text{Гц} \cdot \text{Кл}}$	1,6
Постоянная излучения первая	$c_1=2\pi h c^2$	$3,741832(20) \cdot 10^{-16} \text{Вт} \cdot \text{м}^2$	5,4
Постоянная излучения вторая	$c_2=hc/k$	$0,01438786(45) \text{ м} \cdot \text{К}$	31
Постоянная Ридберга	$R_\infty = \frac{\mu_0^2 m_e c^3 e^4}{8h^3}$	$1,097373177(83) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$	0,08
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60\hbar^3 c^2}$	$5,67032(71) \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	125
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}$ α^{-1}	$0,0072973506(60)$	0,82
		$137,03604(11)$	0,82
Постоянная Фарадея	$F=N_A e$	$9,648456(27) \cdot 10^4 \text{ Кл}/\text{моль}$	2,8
Постоянная электрическая	$\epsilon_0=1/(\mu_0 c^2)$	$8,85418782(7) \cdot 10^{-12} \text{ Ф}/\text{м}$	0,08
Радиус борковский	$a_0=\alpha/(\pi R_\infty)$	$0,52917706(44) \cdot 10^{-10} \text{ м}$	0,82
Радиус электрона классический	$r_e=\mu_0 e^2/(4\pi m_e)$	$2,8179380(70) \cdot 10^{-15} \text{ м}$	2,5
Скорость света в вакууме	c	$299792458 \text{ м}/\text{с}$	-
Ускорение свободного падения стандартное	g	$9,80665 \text{ м}/\text{с}^2$	-

1	2	3	4
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2$	939,5731(27) МэВ	2,8
Энергия покоя протона	$m_p c^2$	938,2796(27) МэВ	2,8
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	0,5110034(14) МэВ	2,8
Энергия соответствующая 1 а.е.м.	mc^2	931,5016(26) МэВ	2,8
Постоянная Вина	b	$2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$	

П р и м е ч а н и е. Числа в круглых скобках указывают стандартную погрешность в последних цифрах приведенного значения величины.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Основные требования техники безопасности при проведении лабораторных работ в учебной лаборатории электричества и электромагнетизма	4
Основы электрических измерений	6
Лабораторная работа № 31. Измерение величины электрического сопротивления с помощью R–моста Уитсона.....	16
Лабораторная работа № 32. Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры	22
Лабораторная работа № 33. Определение емкости конденсатора с помощью С-моста Уитстона	31
Лабораторная работа № 34. Изучение работы электронного осциллографа	37
Лабораторная работа № 35. Изучение работы вакуумного триода и определение его статических параметров	47
Лабораторная работа № 36. Электропроводность жидкостей. Определение числа Фарадея и заряда электрона	54
Лабораторная работа № 37. Исследование режима работы RC-генератора с помощью электронного осциллографа.....	59
Лабораторная работа № 38. Изучение электростатического поля	68
Лабораторная работа № 40. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля земли	78
Лабораторная работа № 41. Изучение стабилитрона и снятие его характеристик	86
Лабораторная работа № 42. Изучение вакуумного диода и определение удельного заряда электрона.....	96
Лабораторная работа № 43. Изучение работы полупроводниковых диодов	100
Лабораторная работа № 45. Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью электронного осциллографа.....	105
Лабораторная работа № 46. Затухающие электрические колебания.....	115
Лабораторная работа № 47. Изучение вынужденных электрических колебаний и снятие семейства резонансных кривых.....	123
Лабораторная работа № 48. Измерение удельного сопротивления.....	130
Лабораторная работа № 49. Определение индуктивности соленоида.....	138
Список литературы	145
Приложение	147

**Дмитрий Борисович Ким
Александр Алексеевич Кропотов
Людмила Андреевна Геращенко**

**Физика.
Электричество и электромагнетизм
Лабораторный практикум**

Подписано в печать
Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$
Печать трафаретная.
Уч.-изд. л. 9,0. Усл. печ. л. 9,0.
Тираж 300 экз. Заказ

Отпечатано в издательстве БрГУ
665709, Братск, ул. Макаренко, 40